

Ingenieurmodell zur Dauerhaftigkeit des Verbundsystems Naturstein/Mörtelfuge mit Bezug auf die Neuverfugung historischen Mauerwerks

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft

Abschließender Bericht in Langfassung

Januar 2000

Dr.-Ing. Frank Schmidt-Döhl

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Ferdinand S. Rostásy

1. ZUSAMMENFASSUNG	3
2. AUSGANGSFRAGEN UND ZIELSETZUNG	5
3. FORSCHUNGSMODELL ZUR RIßBILDUNG BEI NEUVERFUGUNGEN	7
4. INGENIEURMODELL ZUR RIßBILDUNG BEI NEUVERFUGUNGEN	11
4.1 Rißbildung parallel zur Fuge (Flankenrisse)	11
4.2 Rißbildung senkrecht zur Fuge	13
5. BESTIMMUNG VON PARAMETERN ZUR VERIFIKATION DER MODELLE	14
5.1 Bestimmung des Kriech- und Relaxationsverhaltens des HGJ-Mörtels	18
5.2 Festigkeit und Verformungskennwerte als Funktion der Erhärtung des Mörtels	25
5.3 Bestimmung der Sorptionsisothermen der Baustoffe	29
5.4 Schwinden und Quellen des Mörtels	31
6. ÜBERPRÜFUNG VON FORSCHUNGS- UND INGENIEURMODELL	32
6.1 Versuche an gezwängten Zwei-Stein-Körpern und Vergleich mit berechneten Ergebnissen	32
6.1.1 Veränderungen der Temperatur	37
6.1.2 Feuchteprofile in der Mörtelfuge und dem Stein nach dem Ende des Versuchs.	46
6.1.3 Verformungen im Stein	53
6.1.4 Verformungen über die Fuge hinweg	56
6.1.5 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle der Versuchsserien 1a und 1b	60
6.1.6 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle der Versuchsserien 2a und 2b	61
6.1.7 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle der Versuchsserien 3a und 3b	61
6.2 Versuche an einem Mauerwerksausschnitt und Vergleich mit berechneten Ergebnissen	63
6.2.1 Veränderungen der Temperatur	66
6.2.2 Feuchteprofile in der Mörtelfuge und Stein nach dem Ende des Wandversuchs	69
6.2.3 Verformungen im Stein während des Wandversuchs	70
6.2.4 Verformungen über die Fuge hinweg während des Wandversuchs	71
6.2.5 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle des Wandversuchs	72
6.3 Vergleich der Ergebnisse des Ingenieurmodells mit Erfahrungswerten	73
7. DISKUSSION	75
8. LITERATUR	77
ANHANG: BERECHNUNGEN UND HILFETEXTE ZUM INGENIEURMODELL	78

1. Zusammenfassung

Die intakte Verfügu ng historischen Mauerwerks ist für die Unterbindung bzw. Verzögerung von Steinverwitterung und Mörtelzerstörung von großer Bedeutung. Bei der Neuverfügu ng treten durch das unterschiedliche thermische, hygri sche und mechanische Verhalten von Steinen und Mörtel oftmals Verbundrisse zwischen Stein und Mörtel sowie Risse im Mörtel auf. Das Auftreten von Rissen im Verbundsystems Stein/Mörtel kann durch gebräuchliche einfache Untersuchungen nicht zuverlässig vorhergesagt werden. In dem Forschungsvorhaben wurde ein komplexes Forschungsmodell und ein einfaches Ingenieurmodell entwickelt, mit dem Ziel, die Dauerhaftigkeit einer Neuverfügu ng von Natursteinmauerwerk unter gegebenen Randbedingungen vorhersagen zu können. Das Ziel dieser Vorhersage ist, im Vorfeld einer Mörtelapplikation zur richtigen Mörtelauswahl beizutragen. Chemische Einflüsse auf das System (Salzbefrachtung) und Frostangriff blieben dabei zunächst unberücksichtigt.

Die Grundstruktur des Forschungsmodells besteht aus einer Berechnung des Wärme- und Feuchtehaushalts des Mauerwerks, kombiniert mit einer FEM-Berechnung der auftretenden Spannungen unter der Annahme typischer Verformungsrandbedingungen. Dabei wurden auch die zeitabhängigen Verformungen des Mörtels berücksichtigt. Für die Feuchte- und Wärmetransportberechnungen wurde das Simulationsprogramm TRANSREAC verwendet (Simulation gekoppelter Transport- und chemischer Reaktionsprozesse), das im Rahmen des Projektes erweitert wurde. Die Spannungsberechnung wurde mit dem FEM-Programm Ansys durchgeführt.

Die Grundstruktur des Ingenieurmodells besteht aus einer Spannungsberechnung an der Oberfläche eines vollständig gezwängten Stein/Mörtel-Verbundes bei einer Temperaturdifferenz zwischen Mauerwerksinnerem und -oberfläche und der Einstellung des von der relativen Luftfeuchte abhängigen Endschwindmaßes in der Mörtel- und Steinoberfläche. Berücksichtigt werden die thermischen, hygri schen, elastisch/plastischen und viskosen Verformungsanteile der Verbundpartner sowie das Flächenverhältnis von Stein zu Fuge. Das Ingenieurmodell besteht aus einer Tabellenkalkulation mit Hilfetexten.

Zur Verifikation der Modelle wurden experimentelle Untersuchungen zur Rißbildung im Fugenbereich von gezwängten Zwei-Stein-Körpern und einer dreischaligen Natursteinwand durchgeführt. Als Steinmaterialien für die Versuche wurden Harzer Dolomit (hoher E-Modul, wenig saugfähig) und Rüthener Grünsandstein (niedriger E-Modul, porös) verwendet, um einen weiten Bereich möglicher Steineigenschaften abzudecken. Als Verfugmörtel wurde ein modifizierter HGJ-Mörtel auf der Basis von Hüttensand, Anhydrit und Zement verwendet, da von diesem Mörtel bereits eine Reihe von Eingangsdaten für die Modelle vorhanden war. Nicht aus der Literatur zu entnehmende materialspezifische Daten wurden experimentell bestimmt (Grundversuche). Dazu gehörten insbesondere die Bestimmung von Sorptionsisothermen, von WDD-Widerstandszahlen, des Endschwind- und Quellmaßes des Mörtels, einer Reifefunktion für den Mörtel, von reifegradabhängigen Festigkeits- und Verformungskennwerten sowie des von Erstbelastungsalter, Temperatur und Nachbehandlung abhängigen Zugkriech- und -relaxationsverhaltens.

Zur Untersuchung der Rißbildung im Fugenbereich wurden jeweils zwei Steine eines Gesteins in einen steifen und temperierbaren Stahlrahmen eingeklebt und verfugt. Die Rißbildung in den Zwei-Stein-Körpern wurde sowohl unter konstanten Klimarandbedingungen als auch unter einseitiger atmosphärischer Bewitterung untersucht. Zusätzlich wurde aus Rüthener Grünsandstein ein dreischaliger Mauerwerksausschnitt erstellt und atmosphärisch bewittert. Gemessen wurden jeweils die zeitabhängigen Temperaturprofile, das Feuchteprofil am Ende des Versuchs sowie die

Verformungen im Stein, im Mörtel, über die Mörtelfuge hinweg und die klimatischen Randbedingungen (Hauptversuche).

Die Anwendung des Forschungsmodells auf die experimentellen Versuche ergab, daß die Materialfeuchten am Ende der Versuche sowie die Temperaturprofile gut bis zufriedenstellend simuliert werden konnten. Bei den Verformungen waren die Abweichungen sehr viel größer. Die mit dem Forschungsmodell berechneten Spannungskomponenten senkrecht zur Fuge waren stets deutlich größer als die Haftzugfestigkeit. Dies widerspricht dem experimentellen Ergebnis des Wandversuchs, bei dem nur bei sehr breiten Fugen eine Flankenrißbildung beobachtet werden konnte. Das Forschungsmodell überschätzt die Gefahr der Rißbildung. Der auf den FEM-Berechnungen beruhende Teil des Forschungsmodells muß deshalb z.Zt. als unbefriedigend bezeichnet werden. Eine deutlich leistungsfähigere Simulation der Rißgefährdung auf der Basis des Forschungsmodells erfordert bei der FEM-Analyse einen größeren Aufwand, als im Rahmen des Projektes innerhalb einer ersten Förderperiode möglich war (Materialgesetze, örtliche und zeitliche Auflösung).

Zwischen den Ergebnissen des Ingenieurmodells und den experimentellen Untersuchungen waren dagegen nur wenige Widersprüche erkennbar. Die Flankenrißbildung bei den Versuchen mit Zwei-Stein-Körpern wurde i.w. richtig prognostiziert, aber auch das Auftreten von Flankenabrissen bzw. Rissen längs der Fuge im Wandversuch ausschließlich bei sehr breiten Fugen. Bei normalen Fugenbreiten prognostizierte das Modell kein Auftreten von Rissen, was dem Experiment entsprach. Auch das im Wandversuch häufig Risse normal zur Fuge auftraten wurde richtig prognostiziert. Die im Hinblick auf eine Rißvermeidung deutlich besseren Eigenschaften des Rütthener Grünsandsteins traten in Experiment und Berechnung deutlich zutage. Ein Widerspruch zum Experiment konnte nur bei der Prognose der Rißbildung auf der klimatisierten Steinseite des Versuchs mit einseitiger atmosphärischer Bewitterung beobachtet werden. Das Ingenieurmodell prognostizierte Flankenabrisse, im Experiment traten jedoch nicht bei allen, sondern nur bei einem Teil der Versuchskörper Risse auf.

Das Ingenieurmodell kann aufgrund der großen Streuungen der Eigenschaften von Natursteinen und der stark vereinfachten Randbedingungen naturgemäß nur halbquantitativ sein. Es kann jedoch wichtige Hinweise darauf geben, welche Eigenschaften ein Mörtel für eine konkrete Neuverfugung haben muß, um im Zusammenhang des Stein/Mörtel-Verbundsystems ohne Risse und insbesondere ohne Flankenrisse zu bleiben.

Die Wahl des modifizierten HGJ-Mörtels als Versuchsmaterial hat sich im nachhinein als sehr ungünstig herausgestellt, weil dieser Mörtel ein sehr hohes Schwindmaß aufwies. Für die Überprüfung der Modelle wäre es günstiger gewesen, wenn die Rißbildung während der experimentellen Versuche stärker differenziert gewesen wäre und die Schwinddehnung gegenüber der Temperaturdehnung nicht eine so dominierende Rolle eingenommen hätte.

Weiterführende Forschung ist wünschenswert im Hinblick auf eine Verbesserung des Forschungsmodells vor allem im Bereich der Spannungsanalyse mit FEM und eine Verbreiterung der experimentelle Basis zur Verifikation der Modelle, insbesondere eine Variation der Mörtel Eigenschaften und die Verwendung von Mörteln mit geringerem Schwinden.

2. Ausgangsfragen und Zielsetzung

Nur die intakte Verfüzung eines Natursteinmauerwerks führt zu einer Unterbindung bzw. optimalen Verzögerung von Steinverwitterung und Mörtelzerstörung. Bei der Sanierung von Natursteinmauerwerk stellt sich daher immer die Frage nach dem geeigneten Mörtel für die Neuverfüzung. Auch wenn ein Verfugmörtel eine gute Witterungsbeständigkeit besitzt und mit den vorhandenen Altmaterialien chemisch-mineralogisch verträglich ist, stellt die Verbundzone Fugenmörtel/Steinflanke im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Mauerwerk eine empfindliche Schwachstelle dar. Die verschiedenen Steinarten und Mörtel weisen unterschiedliche thermische, hygrische und mechanische Eigenschaften auf. Daraus resultieren neben den lastabhängigen Verformungen, aus den klimatischen Randbedingungen teils behinderte, thermische und hygrische Dehnungen (s. Abb. 1).

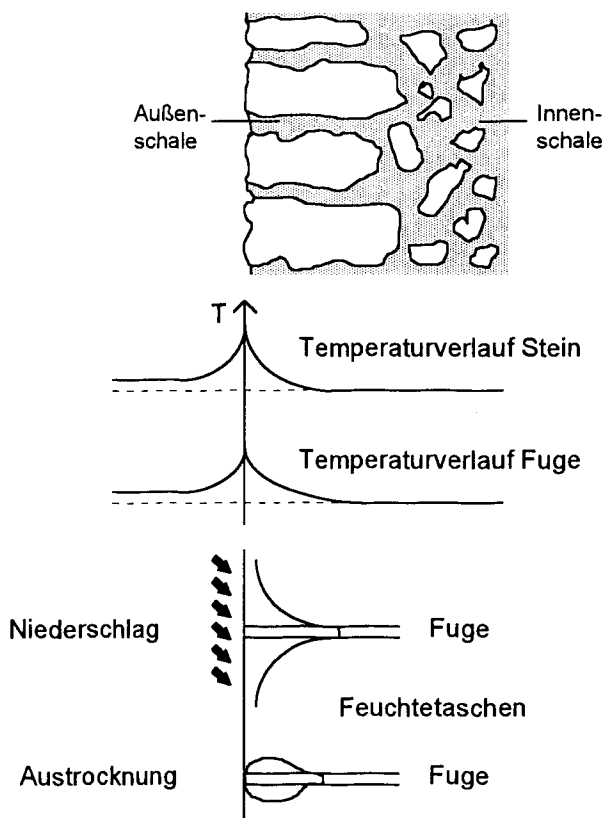


Abb. 1: Thermische und hygrische Beanspruchung eines mehrschaligen Natursteinmauerwerks (schematisch)

Das Dauerhaftigkeitskriterium für das System Fuge/Stein ist die Rißbildung in der Fuge oder im fugennahen Bereich. Diese bildet den Ausgangspunkt für die weitere Zerstörung des Mörtels und der Steinflanken. Rißbildung tritt ein, wenn die Einwirkungen S auf den Haftverbund größer sind als sein Widerstand R . Da Verformungen normal zur Fugenflanke durch die Steinflanken gezwängt sind entstehen Zwangsspannungen σ_{ZW} , die zu Flankenabrissen führen können. Längs der Fuge sind die Verformungen durch inneren Zwang behindert und es entstehen Eigenspannungen

σ_E , die zu Querrissen im Mörtel führen können. Die insbesondere im oberflächennahen Bereich des Mauerwerks auf den Haftverbund einwirkenden Spannungen sind eine Funktion der Feuchte- und Temperaturfelder und unterliegen der Spannungsrelaxation. Sie sind also orts- und zeitabhängig. Der Widerstand R des Haftverbundes hängt ab von der Zugfestigkeit des Steins $\beta_{Z,St}$, des Mörtels $\beta_{Z,M\ddot{o}}$ und der Haftzugfestigkeit β_{HZ} . Der geringste Wert ist maßgeblich. Diese Festigkeiten sind feuchte- und im Falle des Mörtels auch altersabhängig.

Ziel des hier beschriebenen Forschungsprojektes war die Erstellung eines Modells, mit dem unter gegebenen Randbedingungen die o.g. beschriebenen Dauerhaftigkeitsaspekte einer geplanten Neuverfugung eines Natursteinmauerwerks vorhergesagt werden können. Das Modell soll insbesondere zur richtigen Mörtelauswahl beitragen. Mit einem solchen Modell kann im Vorfeld von Applikationen die Eignung eines Mörtels für eine konkrete Anwendung überprüft werden. Bei Nichteignung kann durch Variation der Mörtелеigenschaften ermittelt werden, wie diese verändert werden müssen, damit die Fuge rißfrei bleibt. Chemische Einflüsse auf das System sowie Frost bleiben dabei unberücksichtigt.

3. Forschungsmodell zur Rißbildung bei Neuverfugungen

Das beschriebene Problem wurde einerseits mit einem recht komplexen Forschungsmodell, andererseits mit einem einfacheren Ingenieurmodell angegangen, dessen Entwicklung das eigentliche Ziel des Forschungsprojektes darstellt. Im folgenden wird zunächst das Forschungsmodell beschrieben. Abb. 2 zeigt die Modellbausteine, die zur numerischen Lösung des hier vorliegenden Problems zusammengeführt werden müssen. Zunächst ist ein geeigneter Mauerwerksausschnitt für die numerische Berechnungen zu diskretisieren. Dazu wird ein Modellbaustein GEO benötigt. Abb. 3 zeigt das zugrundeliegende prinzipielle Geometriemodell. Betrachtet wird im wesentlichen die Wetterschale eines in z und y Richtung als unendlich ausgedehnt angenommenen Mauerwerks. Aufgrund der Symetriebedingungen genügt es, die Mörtelfuge und einen Stein jeweils hälftig zu diskretisieren. Daran angrenzende Mauerwerksschalen sind bei der Berechnung von Transportprozessen mit geringer Auflösung zu berücksichtigen.

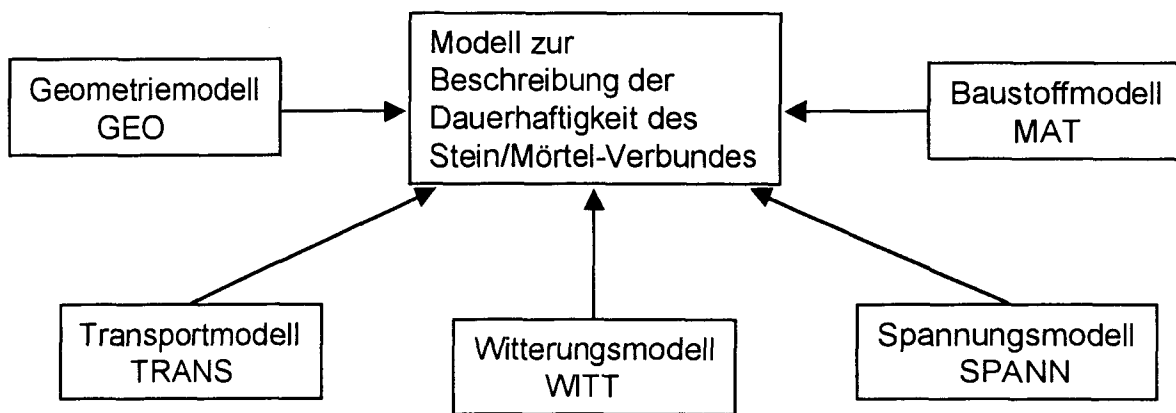


Abb. 2: Bausteine des Forschungsmodells zur Beschreibung der Dauerhaftigkeit des Stein/Mörtel-Verbundes

Das Baustoffmodell MAT stellt alle benötigten baustoffspezifischen Kenngrößen bereit. Das Witterungsmodell WITT bildet das Klima am Bauwerksstandort ab. Im Transportmodell TRANS sind die Wärme- und Feuchtetransportprozesse zeitabhängig zu simulieren. Im Modellbaustein SPANN ist aus den Feuchte- und Temperaturfeldern sowie den Verformungsrandbedingungen die resultierende Spannungsverteilung zu berechnen und im Hinblick auf eine mögliche Rißbildung zu interpretieren. Abb. 3 zeigt die zugrundegelegten Verformungsrandbedingungen im Mauerwerk. In der Ebene D sind die Verschiebungen u_x und u_y vollständig behindert. In den Symmetrieebenen A, B und C sind die Verschiebungen u_y vollständig behindert.

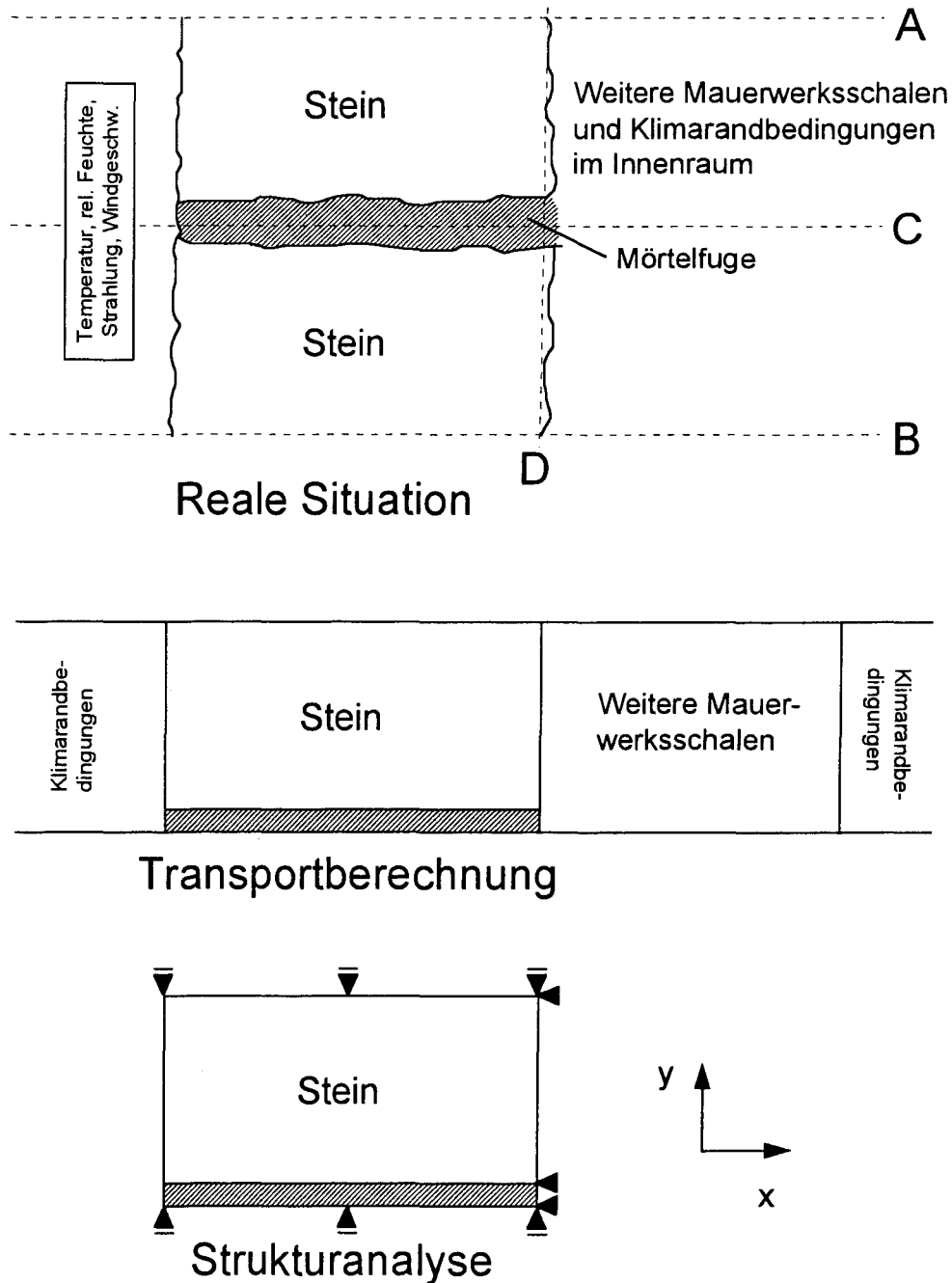


Abb. 3: Geometriemodell und Verformungsrandbedingungen

Wesentliches Ziel des Modell ist, eine Aussage darüber zu treffen ob und ggf. wann es unter gegebenen Randbedingungen zu einer Rißbildung im Fugenmörtel bzw. in der Verbundzone Naturstein/Mörtelfuge kommt. Bis zu diesem Zeitpunkt kann man die hygrischen und thermischen Transportprozesse als unabhängig vom mechanischen Zustand des Systems auffassen. Deshalb war es möglich die Transportprozesse einerseits und die Strukturanalyse andererseits mit unterschiedlicher und problemspezifischer Software zu bearbeiten. Zunächst werden die zeitabhängigen Temperatur- und Feuchtefelder berechnet und anschließend der daraus sich ergebende mechanische Zustand des Systems.

Zur Berechnung der Temperatur- und Feuchtefelder wurde das am iBMB entwickelte Programm Transreac (Transport and reaction) verwendet /13,14/. Dieses Programm stellt für das Modell den Baustein TRANS und WITT sowie Teile der Bausteine GEO und MAT zur Verfügung. Das Programm Transreac wurde ursprünglich für die zeit- und ortsabhängige Simulation der Korrosion mineralischer Baustoffe entwickelt. Bei Beginn des Forschungsprojektes enthielt es bereits ein Modul zur Feuchtetransportberechnung. Darüberhinaus ist Transreac aber auch in der Lage, Diffusionsprozesse beliebig vieler in der Porenflüssigkeit gelöster Teilchen inklusive des Einflusses des dabei auftretenden Diffusionspotentials sowie den "Huckepacktransport" gelöster Teilchen zu simulieren. Außerdem ist es möglich, die in einem Bauteil ablaufenden chemischen Reaktionen (Phasenumwandlungen, Lösungs- und Ausfällungsprozesse) zeit- und ortsabhängig zu berechnen. Diese Funktionen des Programms wurden hier nicht benötigt. Sie eröffnen jedoch die Option, den Einfluß von Salzen im Mauerwerk auf den Schädigungsprozeß zu berücksichtigen und zwar nicht nur im Hinblick auf ihren Einfluß auf die Feuchtetransportprozesse. Transreac wurde für die hier beschriebenen Forschungsarbeiten auf zweidimensionale Berechnungen und die Verarbeitung von Klimadatenreihen erweitert. Außerdem wurden die Ansätze des Transportmodells von H.M. Künzel /7/ mit einigen Vereinfachungen in das Programm integriert. Das Künzel'sche Modell ist ein Verfahren zur Berechnung von gekoppelten Feuchte- und Wärmetransportprozessen, das neueste Ergebnisse über die Physik des Feuchtetransportes in porösen Körpern berücksichtigt. Gleichzeitig hat es den bedeutenden Vorteil, daß es mit vergleichsweise einfach zu bestimmenden Materialkennwerten arbeitet. Während der Feuchte- und Wärmetransportberechnungen im Forschungsmodell wurde die näherungsweise Bestimmung des Flüssigtransportkoeffizienten für das kapillare Saugen über den Wasseraufnahmekoeffizienten und die maximale freie Wasseraufnahme genutzt, wie sie von Künzel /7/ vorgeschlagen wird. Der Flüssigtransportkoeffizient für das Weiterverteilen wurde auf 1/10 des Koeffizienten des kapillaren Saugens gesetzt. Nach den experimentellen Ergebnissen von Künzel /7/ stellt dies für den in der Praxis wichtigen Bereich hoher Luftfeuchten eine gute Näherung dar.

Der Postprozessor des Programms Transreac wurde um eine Schnittstelle zum FEM-Programm Ansys ergänzt. Über diese Schnittstelle ist es möglich, die berechneten zeitabhängigen Feuchte- und Temperaturfelder in Ansys Load-Step-Files abzulegen. Diese wurden anschließend einer zeitabhängigen Strukturanalyse zugrundegelegt. Ansys stellt für das Modell den Baustein SPANN sowie Teile der Bausteine GEO und MAT zur Verfügung. Abb. 4 zeigt die Verknüpfung der beiden Programme zur Lösung des hier beschriebenen Problems.

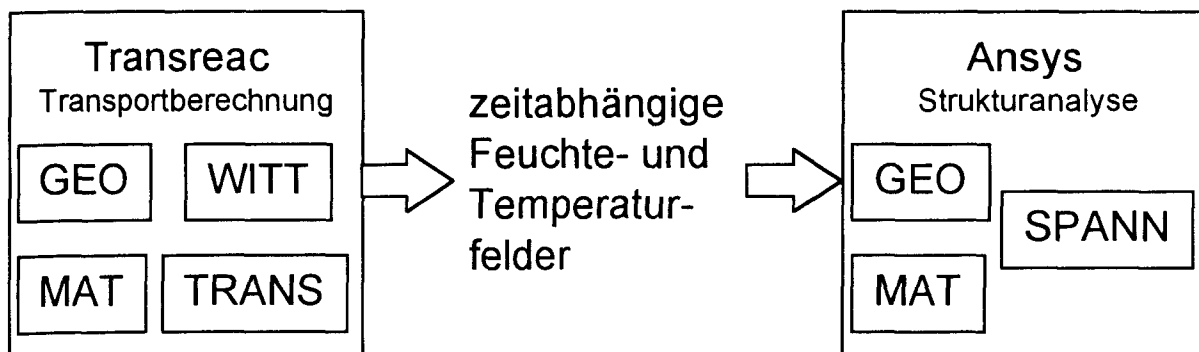


Abb. 4: Verknüpfung der Programme Transreac und Ansys

Ansys wurde gewählt, da es mit diesem Programm prinzipiell möglich ist sowohl nichtlineares Materialverhalten, als auch Kriechen und Relaxieren, Schwinden und Quellen sowie Kontaktprobleme zu behandeln. Leider war es mit der zur Verfügung stehenden Ansys-Version jedoch nicht möglich, direkt Verformungen durch Feuchteänderungen zu berechnen. Dazu wird eine teure Ansys-Versionen mit der Möglichkeit eigener Programmierung benötigt. Diese Schwierigkeit wurde umgangen, indem die aus Feuchteänderungen resultierenden Verformungen in Temperaturverformungen umgerechnet und als zusätzliche Temperaturänderungen an Ansys übergeben wurden. Es war deshalb nicht möglich temperaturabhängige Materialparameter in den Berechnungen zu verwenden. Auch die Simulation des viskoelastischen Verhaltens des Mörtels war nicht unproblematisch. Zum Teil mußte ohne Kriechen und Relaxieren gerechnet werden, da Ansys die auftretenden Kriechraten trotz automatischer Schrittweitensteuerung der Substeps numerisch nicht verarbeiten konnte. Die Spannungsberechnung wurde unter relativ einfachen Bedingungen durchgeführt: linear-elastische Berechnung mit zeitlich konstantem E-Modul (zuzüglich viskoser Verformung des Mörtels), unverschieblichem Verbund zwischen Mörtel und Stein, relativ grobe Elementierung (Element Plane42). Ein Rißkriterium wurde nicht formuliert, eine Simulation von Rißbildung und -wachstum nicht durchgeführt. Es wurden lediglich die berechneten Spannungen im Bereich des Mörtels und des fugennahen Bereichs des Steins im Verhältnis zu den vorliegenden Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeiten betrachtet.

Mit dem so formulierten Forschungsmodell wurden verschiedene Experimente zur Rißbildung in neuverfugten Mauerwerksausschnitten untersucht um seine Funktion zu überprüfen. Die experimentellen und berechneten Ergebnisse werden in Kapitel 6 gegenübergestellt. Für die Praxis ist eine Vorgehensweise wie beschrieben zu langwierig. Kapitel 4 beschreibt deshalb die Ableitung eines einfacheren Ingenieurmodells zur Überprüfung der möglichen Rißbildung bei Neuverfugungen und zur Mörteloptimierung vor der Applikation.

4. Ingenieurmodell zur Rißbildung bei Neuverfugungen

Die Ableitung eines praxisgerechten Ingenieurmodells zur Überprüfung einer möglichen Rißbildung im Fugenbereich und ggf. nötigen Mörteloptimierung im Vorfeld von Mörtelapplikationen war das wesentliche Ziel des Forschungsprojektes. Das Ingenieurmodell wurde in Form einer Tabellenkalkulation mit Hilfetexten erstellt. Die Benutzung setzt lediglich einen Rechner mit einer gängigen Tabellenkalkulation und einem Textverarbeitungsprogramm voraus. Die erstellten Hilfetexte sind Bestandteile dieses Berichtes und im Anhang B aufgeführt. Als Ausgangspunkt zur Ableitung des Ingenieurmodells diente Gleichung 1.

$$0 = \varepsilon_T + \varepsilon_S - \varepsilon_{el.,pl} - \varepsilon_K \quad (1)$$

Sie besagt, daß die Dehnung eines vollständig gezwängten Mörtels oder Verbundsystems aus Stein und Mörtel insgesamt 0 ist und aus den Komponenten Temperaturdehnung ε_T , Schwinddehnung ε_S , der elastischen und plastischen Dehnung $\varepsilon_{el.,pl}$ sowie der Kriechdehnung ε_K bestehen muß. Die einzelnen Komponenten dieser Gleichung werden im folgenden für die beiden Fälle einer Flankenrißbildung und einer Rißbildung im Mörtel normal zur Fuge näher untersucht. Eine Rißbildung im Falle unvollständiger Zwängung übersteigt die Möglichkeiten eines naturgemäß einfachen Ingenieurmodells.

4.1 Rißbildung parallel zur Fuge (Flankenrisse)

Zunächst wird die thermische Dehnung betrachtet. Diese kann über die thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_T von Mörtel und Stein, die maximal auftretenden Temperaturdifferenzen ΔT_{\max} zwischen Mörtel bzw. Stein und dem zwängenden Mauerwerksinneren sowie die Flächenanteile l_0 von Mörtel und Stein berechnet werden:

$$\varepsilon_T = \alpha_{T,M\ddot{o}} \cdot \Delta T_{\max, M\ddot{o}} \cdot l_{0,M\ddot{o}} + \alpha_{T,St} \cdot \Delta T_{\max, St} \cdot (1 - l_{0,M\ddot{o}}) \quad (2)$$

Die Schwinddehnung kann über das Endschwindmaß $\varepsilon_{S,\infty}$ des Mörtels bzw. Steins und die Flächenanteile l_0 von Mörtel und Stein berechnet werden. Das Endschwindmaß ist entscheidend, da man erwarten kann, daß die relative Feuchte in der für die Rißbildung entscheidenden Oberflächen des Steins und des Mörtels sehr schnell den Änderungen der relativen Feuchte der angrenzenden Umgebungsluft folgt. Das bedeutet, das sich direkt an der Oberfläche sehr schnell das zur jeweiligen relativen Feuchte zugehörige Endschwindmaß einstellen will und durch die Zwängung entsprechende Schwindspannungen in der Oberfläche aufgebaut werden:

$$\varepsilon_S = \varepsilon_{S,\infty,M\ddot{o}} \cdot l_{0,M\ddot{o}} + \varepsilon_{S,\infty,St} \cdot (1 - l_{0,M\ddot{o}}) \quad (3)$$

Die elastisch-plastische Dehnung ergibt sich aus der aktuellen Spannung σ_t und dem Sekantenmodul E_{sek} von Stein und Mörtel sowie den Flächenanteilen l_0 von Mörtel und Stein des Verbundsystems Stein/Mörtel. Im Hinblick auf Flankenabrisse wird vom Modell einer Reihenschaltung von Stein und Mörtel ausgegangen.

$$\varepsilon_{el,pl} = \frac{\sigma_t}{\frac{E_{M\ddot{o},sek}}{l_{0,M\ddot{o}} + (1 - l_{0,M\ddot{o}}) \cdot \frac{E_{M\ddot{o},sek}}{E_{St,sek}}} \quad (4)$$

Die Kriechdehnung kann aus der aktuellen Spannung σ_t , den Kriechzahlen φ von Stein und Mörtel dem Elastizitätsmodul E von Stein und Mörtel sowie den Flächenanteilen l_0 von Mörtel und Stein berechnet werden.

$$\varepsilon_K = \sigma_t \cdot (\varphi_{M\ddot{o}} \cdot l_{0,M\ddot{o}} / E_{M\ddot{o}} + \varphi_{St} \cdot l_{0,St} / E_{St}) \quad (5)$$

Untersucht man die in den Gleichungen 2 bis 5 auftretenden Variablen, lassen sich diese in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe umfaßt Parameter, die am Bauwerk bestimmbar sind, dies ist der Flächenanteil der Fugen $l_{0,M\ddot{o}}$ (0...1). Bei Benutzung des Ingenieurmodells ist die Spannweite dieses Parameters am Bauwerk zu ermitteln und mit den beiden Extremwerten zu rechnen.

Die nächste Gruppe umfaßt Parameter die idealerweise experimentell zu bestimmen sind was jedoch i.d.R. nur mit einem nicht praxisgerechten Aufwand zu realisieren ist. Darunter fallen die Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T , die maximal möglichen Temperaturdifferenzen ΔT , die Endschwindmaße $\varepsilon_{S,\infty}$, und die Kriechzahlen φ jeweils für den Stein und den Mörtel sowie der E-Modul des Steins. Für diese Parameter werden innerhalb des Ingenieurmodells Hilfen gegeben, wie diese für eine konkrete Sanierungsaufgabe abgeschätzt werden können, wenn sie nicht experimentell bestimmt werden.

Die dritte Gruppe umfaßt Parameter für die das Ingenieurmodell Werte ermittelt, die dann der Mörtelauswahl zugrundegelegt werden müssen um eine Ribbildung parallel zu den Fugenflanken zu vermeiden. Zu dieser Gruppe gehört die Spannung σ_t normal zur Fugenflanke. Diese darf weder von der Mörtelfestigkeit, noch der Steinfestigkeit, noch der Haftzugfestigkeit unterschritten werden. Weiterhin gehört hierzu der E-Modul des Mörtels $E_{M\ddot{o}}$, wobei dieser zur Vereinfachung im Ingenieurmodell nicht vom Sekantenmodul durch den Ursprung unterschieden wird.

Einsetzen der Gleichungen 2 bis 5 in Gl. 1 und Auflösung nach der maximal aufnehmbaren Spannung durch das Verbundsystem Mörtel/Stein bzw. nach dem E-Modul des Mörtels führt zu den Gleichungen 6 und 7:

$$\sigma_T = \frac{l_{0,M\ddot{o}} \cdot (\alpha_{T,M\ddot{o}} \cdot \Delta T_{M\ddot{o},max} + \varepsilon_{S,\infty,M\ddot{o}}) + l_{0,St} \cdot (\alpha_{T,St} \cdot \Delta T_{max,St} + \varepsilon_{S,\infty,St})}{\frac{l_{0,M\ddot{o}} + l_{0,St} \cdot E_{M\ddot{o},sek} \cdot 1/E_{St,sek}}{E_{M\ddot{o},sek}} + \varphi_{M\ddot{o}} \cdot l_{0,M\ddot{o}} / E_{M\ddot{o}} + \varphi_{St} \cdot l_{0,St} / E_{St}} \quad (6)$$

$$E_{M\ddot{o}} = \frac{1}{\frac{(l_{0,M\ddot{o}} \cdot (\alpha_{T,M\ddot{o}} \cdot \Delta T_{max,M\ddot{o}} + \varepsilon_{S,\infty,M\ddot{o}}) + l_{0,St} \cdot (\alpha_{T,St} \cdot \Delta T_{St,max} + \varepsilon_{S,\infty,St}))}{\sigma_t} - \varphi_{St} \cdot l_{0,St} / E_{St} - l_{0,St} / E_{St,sek}} \cdot l_{0,M\ddot{o}} + \varphi_{M\ddot{o}} \cdot l_{0,M\ddot{o}} \quad (7)$$

Diese Gleichungen wurden in die o.g. Tabellenkalkulation umgesetzt, die mit zahlreichen Hilfestellungen zur Ermittlung der Eingangsdaten sowie zur Interpretation der beiden Werte σ_t und $E_{M\ddot{o}}$

versehen wurde. Die Ergebnisse der Kalkulation wurden anhand verschiedener experimenteller Versuche überprüft.

4.2 Rißbildung senkrecht zur Fuge

Im Gegensatz zur Flankenrißbildung muß im Falle einer Rißbildung senkrecht zur Fuge nicht eine Reihenschaltung von Stein und Mörtel betrachtet werden, sondern eine Parallelschaltung. Allerdings ist der Einfluß des Steins auf die Rißbildung im Mörtel gegenüber den Eigenspannungen des Mörtels selbst unbedeutend. Das Ingenieurmodell betrachtet deshalb in diesem Fall kein Verbundsystem aus Stein und Mörtel sondern lediglich den Mörtel. Die Überlegungen gehen dabei wieder von einem vollständig gezwängten System aus.

Die thermische Dehnung kann dann über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_T des Mörtels und die maximal auftretenden Temperaturdifferenz ΔT_{\max} zwischen Mörtel und dem zwängenden Mauerwerksinneren berechnet werden:

$$\varepsilon_T = \alpha_{T,M\ddot{o}} \cdot \Delta T_{\max, M\ddot{o}} \quad (8)$$

Die Schwinddehnung entspricht dem relevanten Endschwindmaß $\varepsilon_{S,\infty}$ des Mörtels.

$$\varepsilon_S = \varepsilon_{S,\infty,M\ddot{o}} \quad (9)$$

Die elastisch-plastische Dehnung ergibt sich aus der aktuelle Spannung σ_t und dem Sekantenmodul E_{sek} des Mörtels

$$\varepsilon_{\text{el,pl}} = \sigma_t / E_{\text{sek}} \quad (10)$$

Die Kriechdehnung kann aus der aktuellen Spannung σ_t , der Kriechzahl φ des Mörtels und dem Elastizitätsmodul E des Mörtels berechnet werden.

$$\varepsilon_K = \sigma_t \cdot \varphi_{M\ddot{o}} / E_{M\ddot{o}} \quad (11)$$

Einsetzen der Gleichungen 8 bis 11 in Gl. 1 und Auflösung nach der maximal aufnehmbaren Spannung durch den Mörtel bzw. nach dem E-Modul des Mörtels führt zu den Gleichungen 12 und 13.

$$\sigma_t = E_{M\ddot{o}} \cdot (\alpha_{T,M\ddot{o}} \cdot \Delta T_{\max, M\ddot{o}} + \varepsilon_{S,\infty,M\ddot{o}}) / (1 + \varphi_{M\ddot{o}}) \quad (12)$$

$$E_{M\ddot{o}} = \sigma_t \cdot (1 + \varphi_{M\ddot{o}}) / (\alpha_{T,M\ddot{o}} \cdot \Delta T_{\max, M\ddot{o}} + \varepsilon_{S,\infty,M\ddot{o}}) \quad (13)$$

Auch diese Gleichungen wurden in die Tabellenkalkulation umgesetzt. Zusätzliche Kenngrößen gegenüber dem Modell zur Prognose von Flankenrissen werden nicht benötigt.

5. Bestimmung von Parametern zur Verifikation der Modelle

Die entwickelten Forschungs- und Ingenieurmodelle wurden anhand von experimentellen Untersuchungen und vergleichenden Berechnungen überprüft. Zur Durchführung der Berechnungen und Interpretation ihrer Ergebnisse waren eine Reihe von Daten notwendig, die in diesem Kapitel vorgestellt werden. Die weitaus meisten Parameter werden nur für das Forschungsmodell benötigt. Der Umfang notwendiger Daten für das Ingenieurmodell ist viel geringer. Diese sind in Kapitel 4.1. aufgeführt.

Die zur Verifikation der Modelle vorgesehenen Experimente wurden mit zwei Natursteinen (Rüthener Grünsandstein und Harzer Dolomit) mit sehr unterschiedlicher Porosität und Porenstruktur durchgeführt. Beide Gesteine sind kaum bis undeutlich geschichtet. Der Rüthener Grünsandstein ist ausführlich als Gestein Nr. 131, der Harzer Dolomit als Gestein Nr. 163 in Grimm /4/ beschrieben. Porenradienverteilungen sind in /4/, /9/ und /15,12/ (nur Grünsandstein) sowie /10/ (nur Harzer Dolomit) wiedergegeben. Als Verfugmörtel wurde ein modifizierter HGJ-Mörtel verwendet. Es handelt sich hierbei um einen Mörtel mit einem Bindemittel auf der Basis von Hütten- sand, Anhydrit, Zement und Wasser mit Zusatz von Altpapierfasern, einem Haftvermittler, Ver- flüssiger, Erhärtungsbeschleuniger sowie Methylcellulose zur Schwindkompensation. Er wird z.B. in /17/ beschrieben (hier bezeichnet als HAJm). Die Rezeptur ist in Tab. 1 aufgeführt. Von diesem Mörtel wurden in der Vergangenheit bereits eine Reihe von Kenndaten ermittelt, die für dieses Projekt zur Verfügung standen und nicht neu bestimmt werden mußten.

Tab. 1: Zusammensetzung des modifizierten HGJ-Mörtels

	Rezepturbestandteil	Anteil am Frischmörtel in Gew. %
Bindemittel	Hütten sand	61,65
	Anhydrit	3,48
	Gießereibinder, Fa. Heidelberger Zement (modifizierten Port- landzement mit sehr kurzer Erstarrungszeit und hoher Anfangs- festigkeit)	3,48
Zusätze	LC-Fasern, Altpapierfasern hergestellt durch das Wilhelm- Klauditz-Institut, Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung	3,48
	Methylcellulose Walocel MKX 15000 PP 11, Fa. Wolff, zur Schwindkompensation	0,18
	Mowilith Pulver DM 200 P, Fa. Hoechst, zur Haftvermittlung	1,72
	Melment F 10, Fa. SKW Trostberg, Verflüssiger	0,68
	Calciumformiat, zur Erhärtungsbeschleunigung	1,37
Wasser	Wasser	24,01

Die Tabellen 2 und 3 geben einen Überblick über die hier relevanten materialspezifischen Kenn- werte der zwei Natursteine und des Mörtels. Sie wurden entweder experimentell bestimmt oder aus der Literatur entnommen.

Tab. 2: Materialspezifische Kennwerte (S – senkrecht zur Schichtung, P - parallel zur Schichtung). Nicht mit einer Literaturangabe versehene Daten wurden im Rahmen des Projektes experimentell bestimmt. Fortsetzung in Tabelle 3.

	Harzer Dolomit	Rüthener Grünsandstein	HGJ modifiziert
Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0,5}$	0,64 (Messwerte A. Rinne)	10,22 (Messwerte A. Rinne), 10,3 /15,12/, 17-20 /8/, verwendet: 10,3	0,037 (Messwerte A. Rinne), 0,1 /17/, verwendet: 0,1
Trockenrohdichte in g/cm^3	2,6 (Messwerte A. Rinne), 2,74 /4/, verwendet: 2,74	2,03 (Messwerte A. Rinne), 2,08 /4/, 1,99 /1/, 2,06 /15,12/, verwendet: 2,03	1,54 (Messwerte A. Rinne), 1,50, verwendet: 1,50
Maximale freie Wasseraufnahme	1,07 M.% /4/ entspricht 2,9 Vol.%	20 Vol.% /6/, 21,8 Vol.% /1/, 11 M.% /1/, 7,04 M.% /4/, 14,0 Vol.% /15/, 7,5 M.% /12/, 9-9,5 M.% /8/, verwendet: 20 Vol.%	24±2 Vol.%, verwendet: 26 Vol.%
Sorptionsisotherme.	Siehe Kap. 5.3	Siehe Kap. 5.3, auch in /6/	Siehe Kap. 5.3
Wärmekapazität in $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	850 Schätzung nach /7/	850 Schätzung nach /7/	850 Schätzung nach /7/
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr}}$ DIN 52612 in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	3,17 (A. Rinne)	1,53 (A. Rinne)	0,36 (A. Rinne)
Feuchtezuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit in %/M.% Wasser	8 Schätzung nach /7/	8 Schätzung nach /7/	8 Schätzung nach /7/
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl im Trockenbereich	129	17 nach /6/	73 ± 8
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	0,8 Schätzung nach /7/	0,8 Schätzung nach /7/	0,8 Schätzung nach /7/
E-Modul in N/mm^2	81400, 21500 (porös) - 81500 (dicht) dyn. /10,9/	5900 S 6300 P stat. Zug /2/, 10600 dyn. Zug /1/, 14400-16100 dyn. /9/	14920 dyn. /10,9/, 12700 stat. /17/, 18000 dyn. /17/, siehe Kap. 5.2
Querdehnzahl	0,25 Schätzung nach /3/	0,061 S 0,094 P /2/, verwendet: 0,08	0,5 /17/, siehe Kap. 5.2
Lineare Wärmedehnzahl in 10^{-6}K^{-1}	4,2±0,6 (Messwerte A. Rinne)	8,3±0,8 (Messwerte A. Rinne)	9,1±1,1 (Messwerte A. Rinne), 12,48 -20-20°C 13,34 20-50°C /17/

Tab. 3: Materialspezifische Kennwerte (S – senkrecht zur Schichtung, P - parallel zur Schichtung). Nicht mit einer Literaturangabe versehene Daten wurden im Rahmen des Projektes experimentell bestimmt. Fortsetzung von Tabelle 2.

	Harzer Dolomit	Rüthener Grünsandstein	HGJ modifiziert
Nichtlineares Materialverhalten σ - ϵ Linie	Annahme: linear	Experimentell in /2,1/, Annahme: linear	Siehe Kap. 5.2
Zentrische Zugfestigkeit in N/mm ²	3,5–30,0 /9/	1,10–8,40 /9/, 1,4 S 1,2 P /2/, 1,25 /1/	3,36 /10,9/, 4,0 /17/, siehe Kap. 5.2
Zugbruchdehnung bzw. Zugdehnung bei Höchstkraft in mm/m		0,46 S 0,45 P /2/	Siehe Kap. 5.2
Kriech-/Relaxationsverhalten	Annahme: vernachlässigbar	Endzugkriechzahl 0,71 S Enddruckkriechzahl 0,056 S und weitere Daten in /2/	Siehe Kap. 5.1
Schwinden/Quellen	Annahme: vernachlässigbar	0,15 mm/m S 0,12 mm/m P nach 1 Jahr in Klima 20/30 –0,34 mm/m S –0,33 mm/m P Quellen nach 1 Jahr und weitere Daten in /2/, 0,1 mm/m /15/, –0,08– 0,25 mm/m /12/	Quellen 1,12 mm/m / 7 Tage /17/, Schwinden – 0,55 mm/m 7 Tage /17/, siehe Kap. 5.3
Haftzugfestigkeit Mörtel/Stein in N/mm ²	0,75–1,41 /10/, 1,18 /11/	1,1–1,4 (A. Rinne)	Entfällt

Tabelle 4 zeigt weitere materialspezifische Daten der zwei Natursteine und des HGJ-Mörtels, die für die hier vorgenommenen Berechnungen bzw. die Interpretation ihrer Ergebnisse jedoch nicht relevant sind.

Tab. 4: Materialspezifische Kennwerte (S – senkrecht zur Schichtung, P - parallel zur Schichtung).

	Harzer Dolomit	Rüthener stein	Grünsand-	HGJ modifiziert
Reindichte in g/cm ³	2,85 /4/	2,73 /4/		2,90 /9/
Ausgleichsfeuchte bei 20°C/65% r.F.		0,36 M.% /1/, 0,2 M.% /12/		
Dichte bei der Ausgleichsfeuchte 20°C/65% r.F. in g/cm ³		2,05 /1/		
Waseraufnahme unter 15 MPa		24,8 Vol.% /1/, 12,5 M.% /1/, 23,3 Vol.% /15/, 11,3 M.% /12/		
S-Wert	0,77 /4/	0,88 /1/, 0,61 /4/		
Druckfestigkeit in N/mm ²	89,9-167 /10,9/	45,5-55,5 /9/, 32 /1/		46,79 /10/, 47,6 /17/ siehe Kap. 5.2
Wasseraufnahme unter Vakuum bzw. gesamte offene Porosität	5,975 Vol. %, 1,41 M.% /4/, 3,85 Vol. % /4/	11,57 M.% /4/, 23,97 Vol. %, /4/, 26,6 Vol. % /1/		

Neben den materialspezifischen Daten sind für die Modelle auch die Feuchte- und Temperaturverteilungen zum Zeitpunkt des Simulationsbeginns und die zeitabhängigen Klimarandbedingungen von Bedeutung. Diese umfassen die Temperatur, die relative Luftfeuchte, die Schlagregenbelastung, die Strahlungsleistung senkrecht zur Bauteiloberfläche, die Wärme- und Wasserdampfübergangskoeffizienten und die Niederschlagsabsorptionszahl.

Der Schlagregen R_s in kg/m²s wurde bei freier Bewitterung aus dem Normalregen R_N in mm, der Windgeschwindigkeit WG in m/s, der Windrichtung WR in °, dem Schlagregenkoeffizient r_s , der Richtung der Normalen auf die Bauteiloberfläche B_N in ° und dem Zeitintervall Δt in s nach folgenden Gleichungen errechnet:

Falls $\cos(WR + B_N) > 0$: $R_s = R_N/\Delta t \cdot r_s \cdot WG \cdot \cos(WR+B_N)$ (14)

Falls $\cos(WR + B_N) < 0$: $R_s = 0$ (15)

Der Schlagregenkoeffizient wurde nach /7/ auf 0,2 gesetzt, die Niederschlagsabsorptionszahl auf 0,8 (Schätzwert). Die Wärmeübergangskoeffizienten α in W/m²K und Feuchteübergangskoeffizienten β_p in kg/m²sPa bei freier Bewitterung wurden aus der Temperatur T in °C und der Windgeschwindigkeit WG in m/s nach folgenden Gleichungen berechnet:

Bei $T < 20$ °C: $\alpha = 7 + WG \cdot 3,12$ (16)

Bei $T \geq 20$ °C: $\alpha = 9 + WG \cdot 3,12$ (17)

$\beta_p = 9,2 \cdot 10^{-8} + 2,2 \cdot 10^{-8} \cdot WG$ (18)

Bei freier Bewitterung wurden die Klimarandbedingungen mit einer automatischen Klimameßstation (Temperatur, relative Feuchte, Strahlung, Windrichtung und -stärke) ermittelt, die am Standort der Probekörper positioniert war. Die Klimameßstation wurde aus Eigenmitteln des iBMB beschafft. Im Falle erzwungener, konstanter Klimarandbedingungen (s. Kap. 6.1 zum experimentellen Aufbau) wurde mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ und einem Feuchteübergangskoeffizienten von $42 \cdot 10^{-9} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ gerechnet.

5.1 Bestimmung des Kriech- und Relaxationsverhaltens des HGJ-Mörtels

Durch das viskoelastische Materialverhalten der Verbundpartner Mörtel und Stein werden Zwang- und Eigenspannungen zeitabhängig reduziert. Die viskosen Verformungen des Harzer Dolomits wurden vernachlässigt, die Verformungen des Rühthener Grünsandsteins nach Literaturangaben nur im Ingenieurmodell berücksichtigt. Dagegen wurde das viskoelastische Materialverhalten des Mörtels in Zugkriech- und -relaxationsversuchen untersucht und in allen Modellberechnungen zum Ansatz gebracht. Als Proben dienten Normmörtelprismen die im mittleren Bereich hantelförmig auf eine Querschnittsfläche von $20 \times 40 \text{ mm}$ ausgedünnt waren. Die Dehnungen wurden über DMS an den 4 Seitenflächen der Prismen aufgenommen. Die lastunabhängigen Verformungen wurden über gleich vorbehandelte und isolierte Ausgleichskörper kompensiert. Abb. 5 zeigt einen der Probekörper zusammen mit einer Aufnahme eines der Prüfstände. Die Prüfkörper wurden oben und unten gelenkig gelagert. Die Relaxationsprüfstände erlaubten es, ca. 80% der Ausgangslast (Wasser) abzulassen.

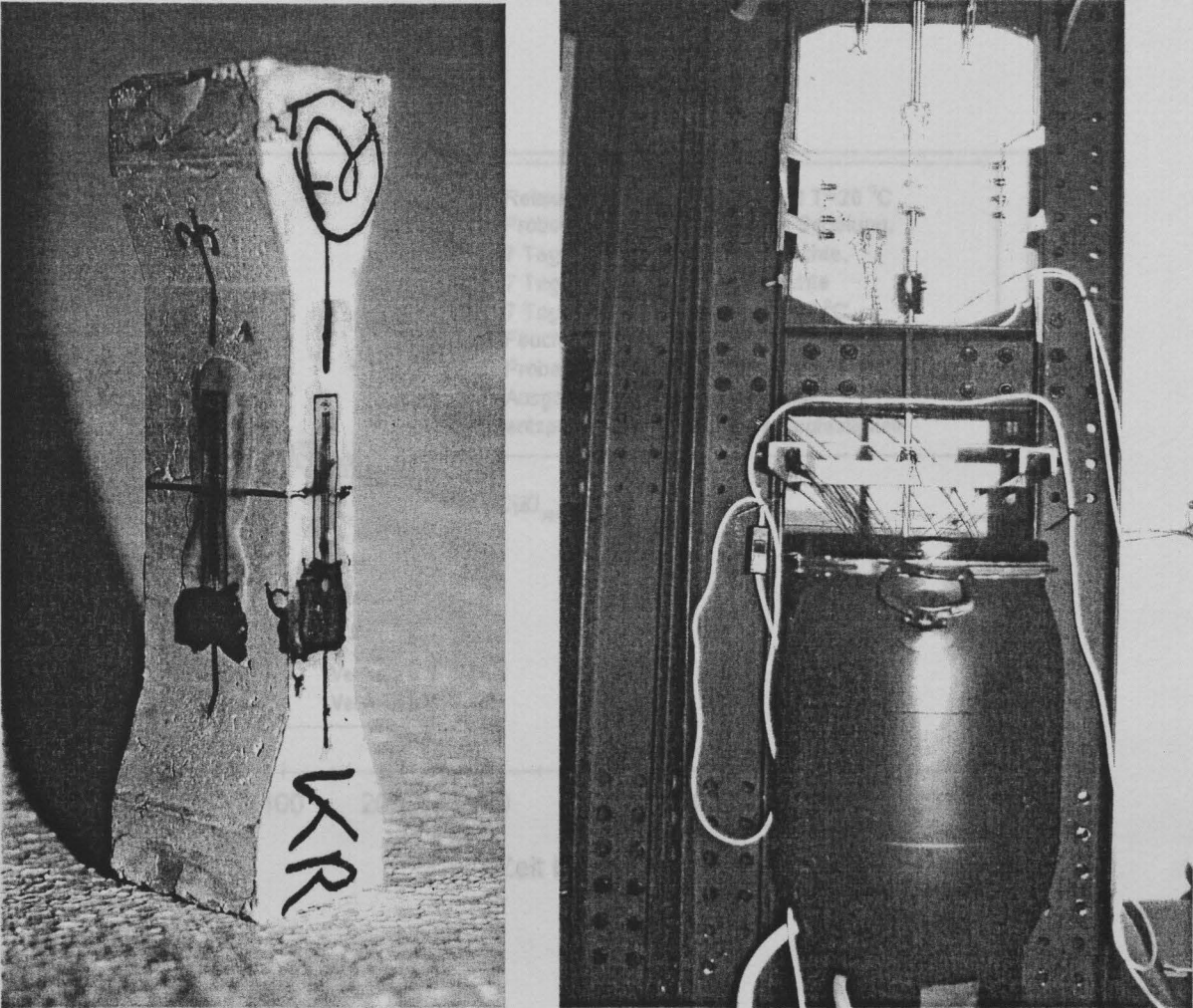


Abb.5: Links Mörtelprobekörper für die Zugkriech- und -relaxationsversuche, rechts Relaxationsprüfstand.

Insgesamt wurden 22 Versuche in verschiedenen Belastungsaltern, bei verschiedenen Erhärtungsbedingungen sowie mit verschiedenen Belastungsgraden durchgeführt (jeweils 2 Proben pro Versuchsbedingung), deren Ergebnisse in den folgenden Abbildungen dargestellt sind.

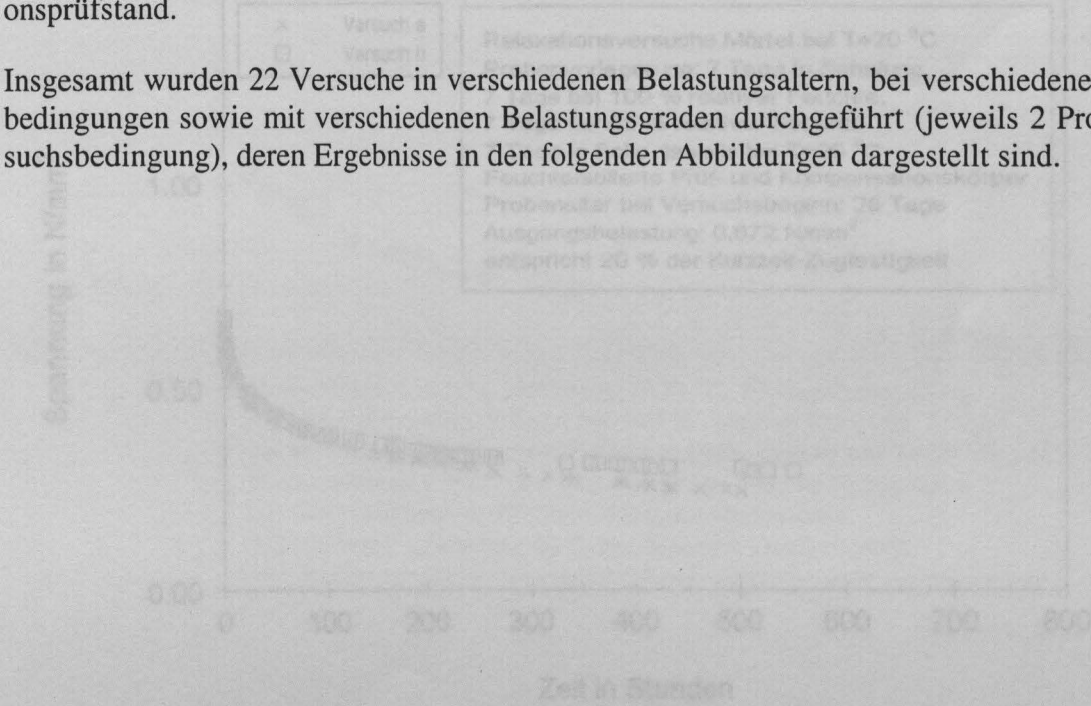


Abb. 6: Relaxationsverhalten des modifizierten HGO-Mörtels. Fortsetzung Abb. 7.

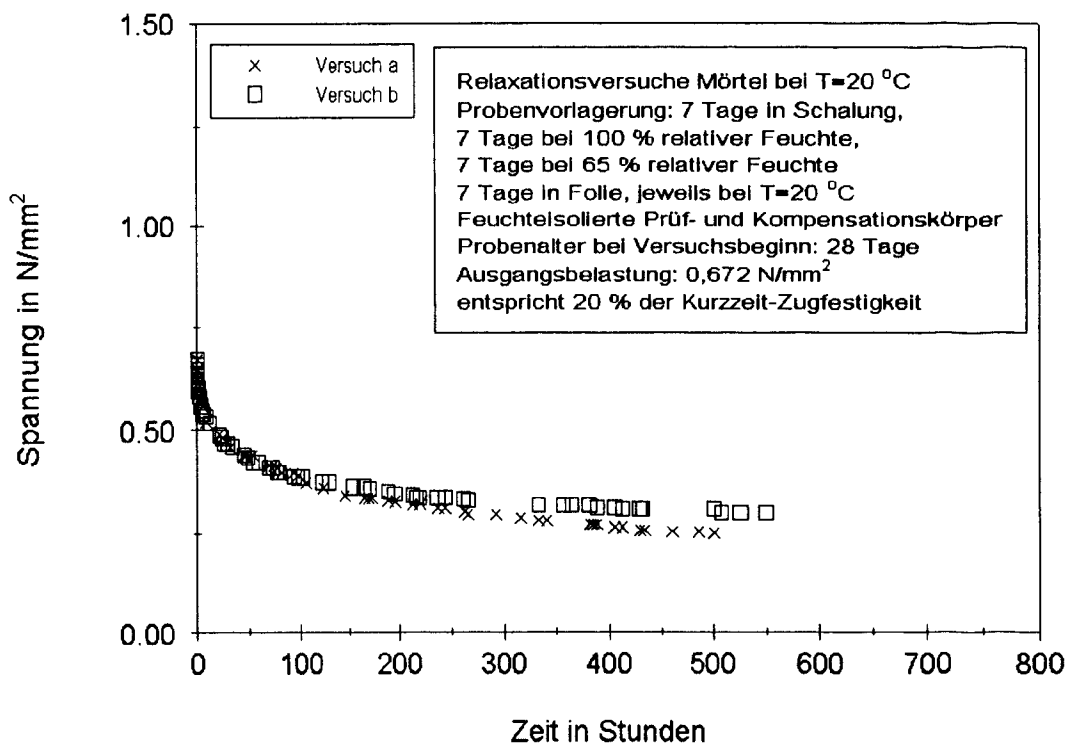
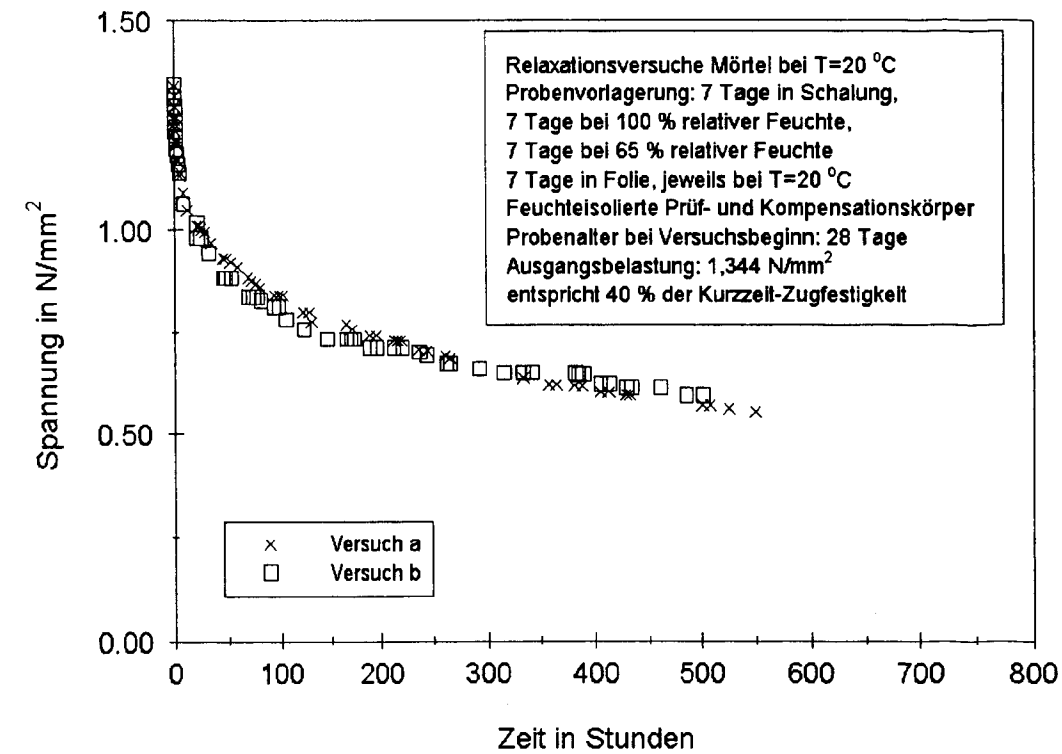


Abb. 6: Relaxationsverhalten des modifizierten HGJ-Mörtels. Fortsetzung Abb. 7.

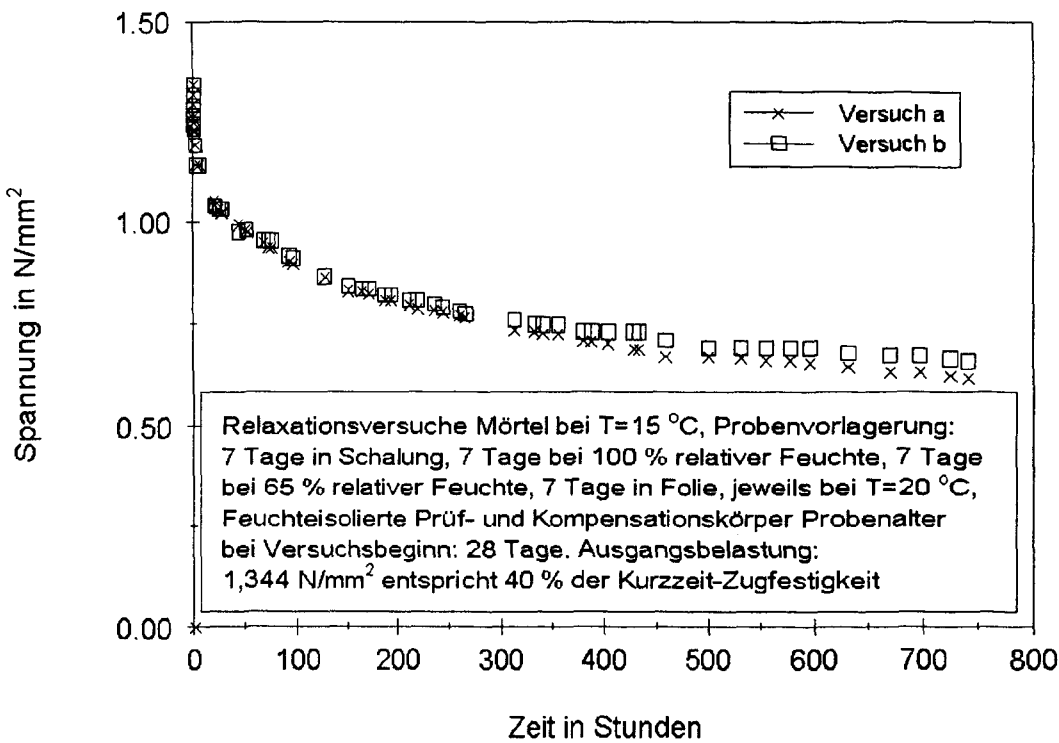
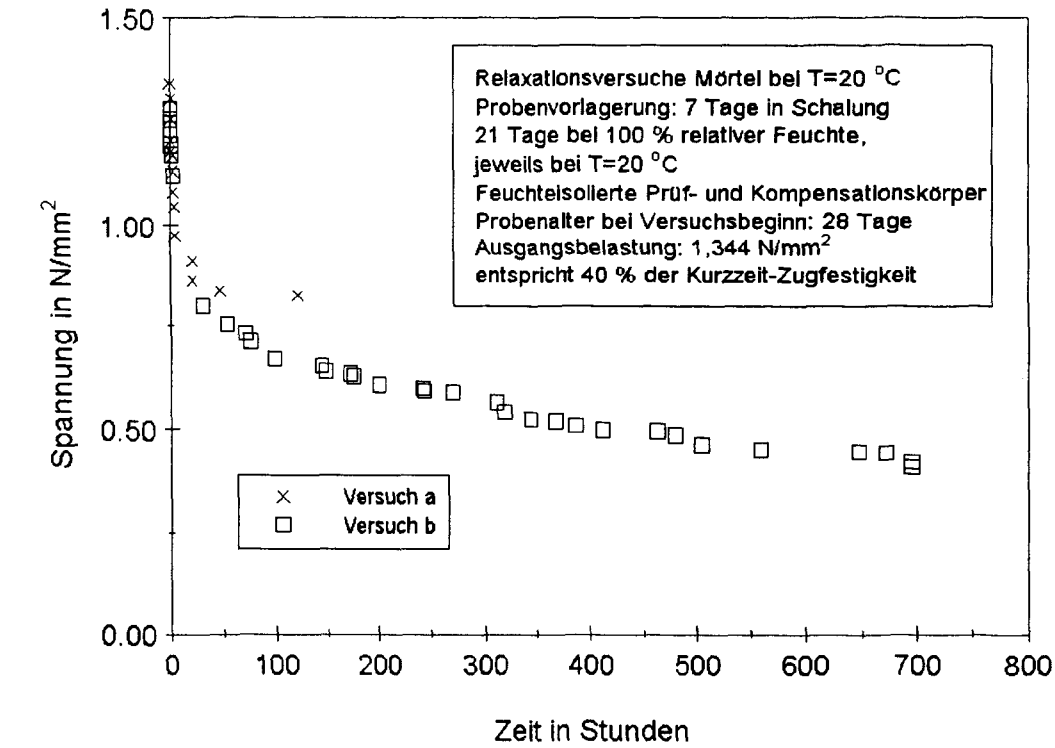


Abb. 7: Relaxationsverhalten des modifizierten HJ-Mörtels. Fortsetzung Abb. 8.

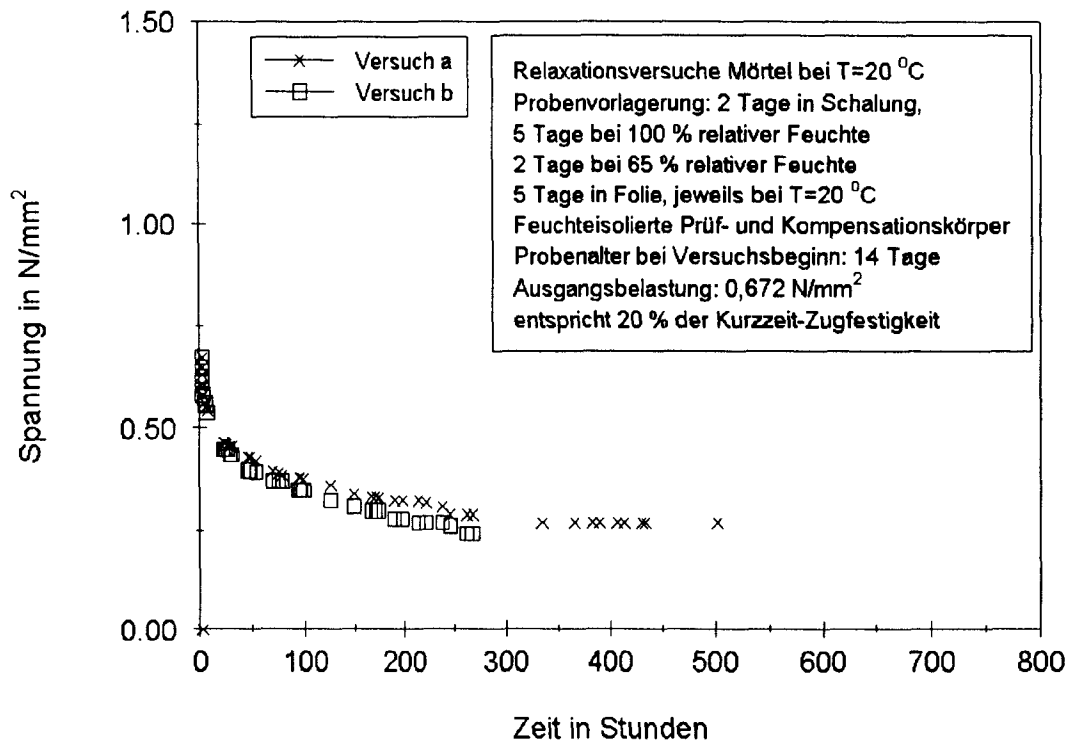
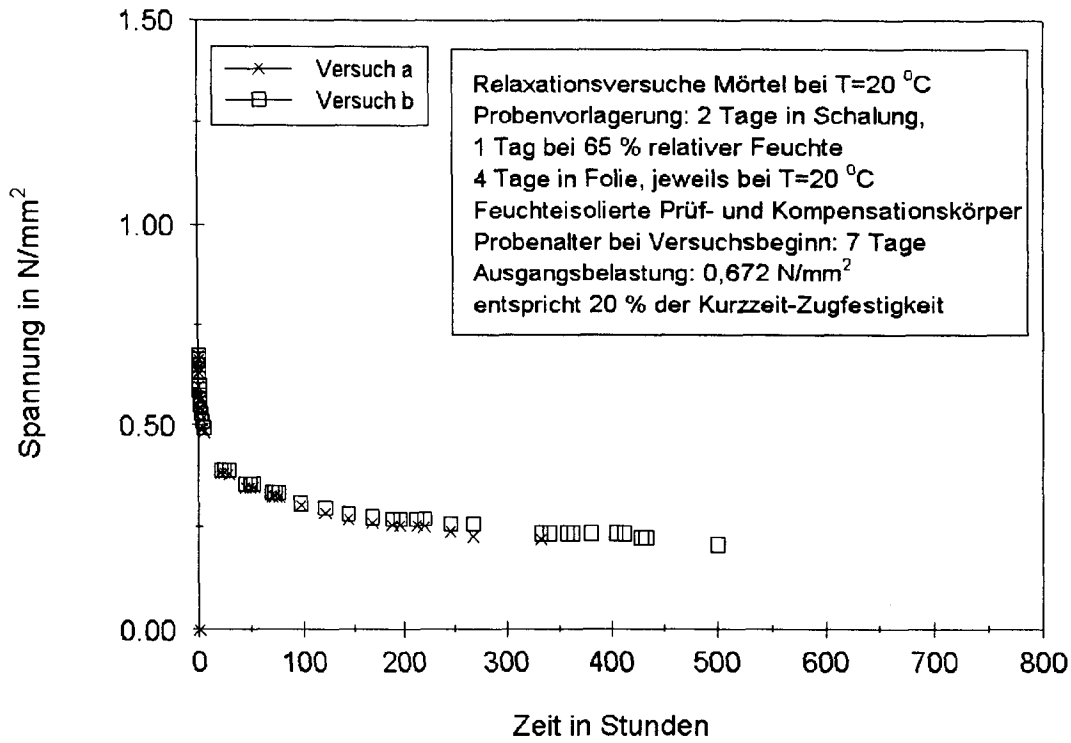


Abb. 8: Relaxationsverhalten des modifizierten HGJ-Mörtels.

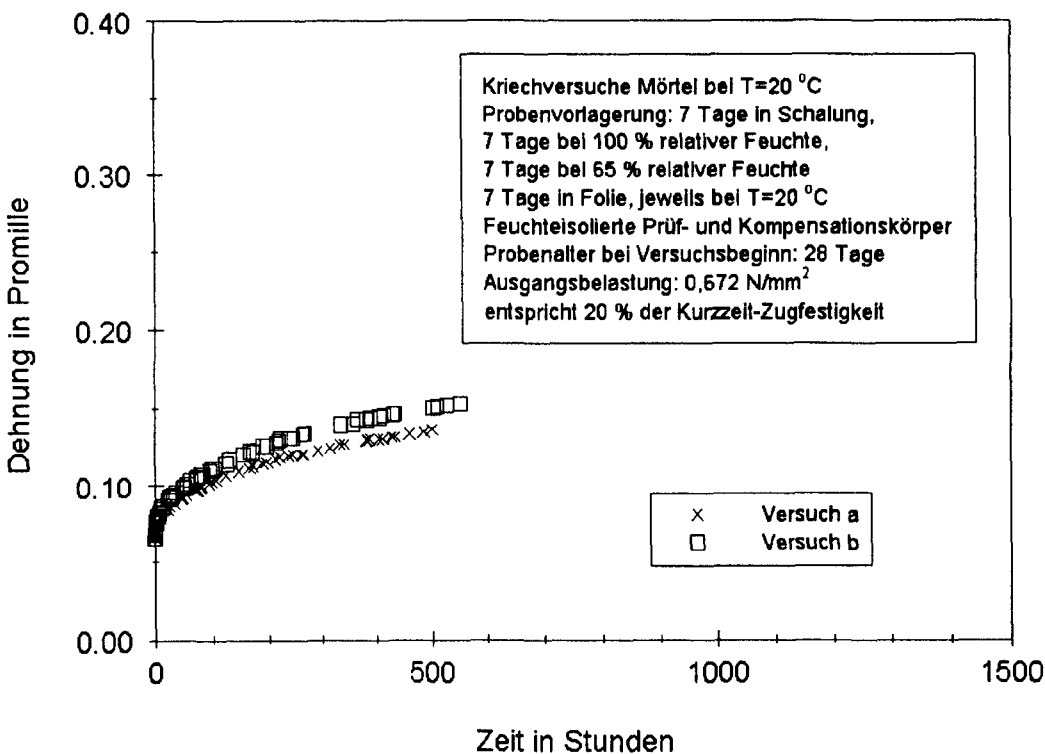
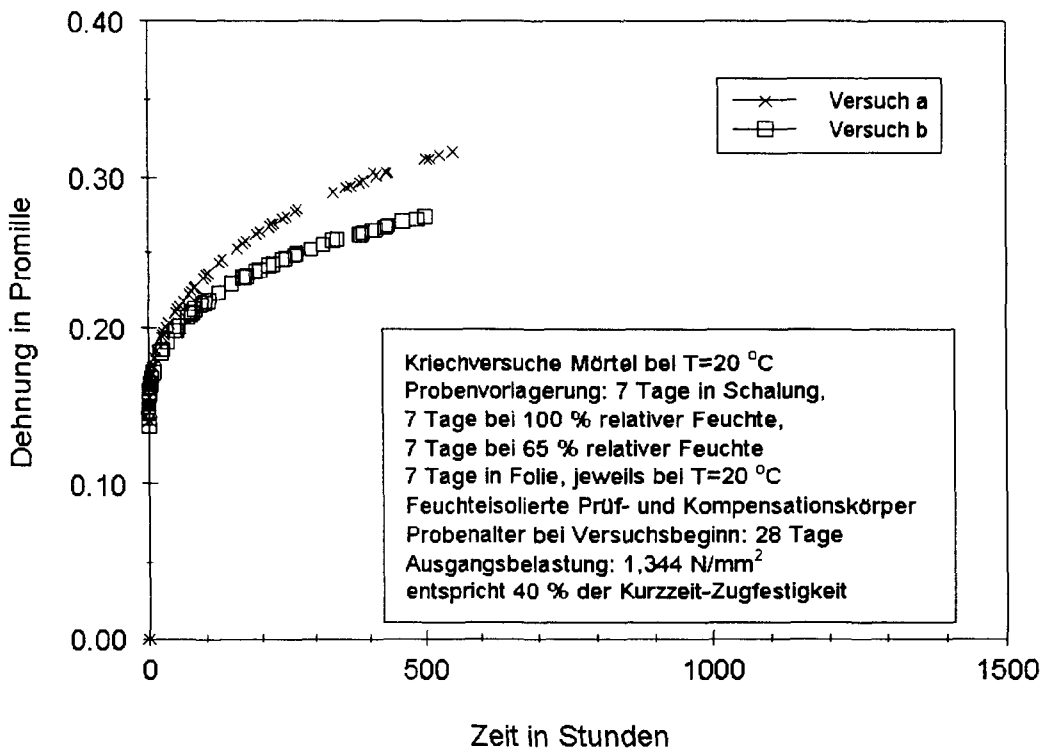


Abb. 9: Kriechverhalten des modifizierten HGJ-Mörtels. Fortsetzung Abb. 10.

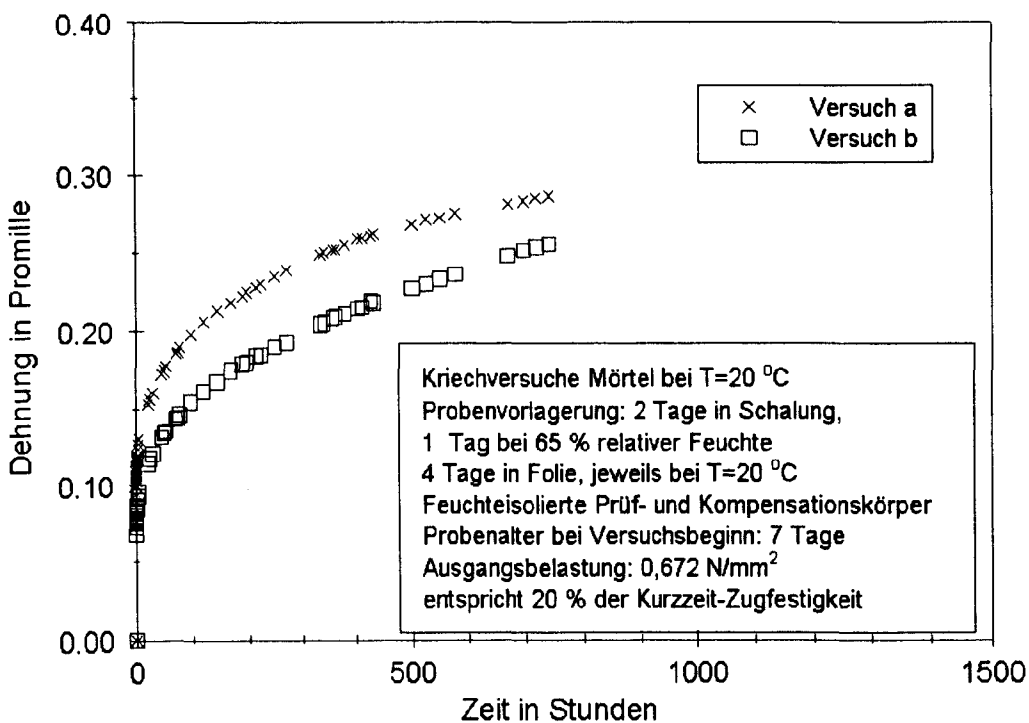
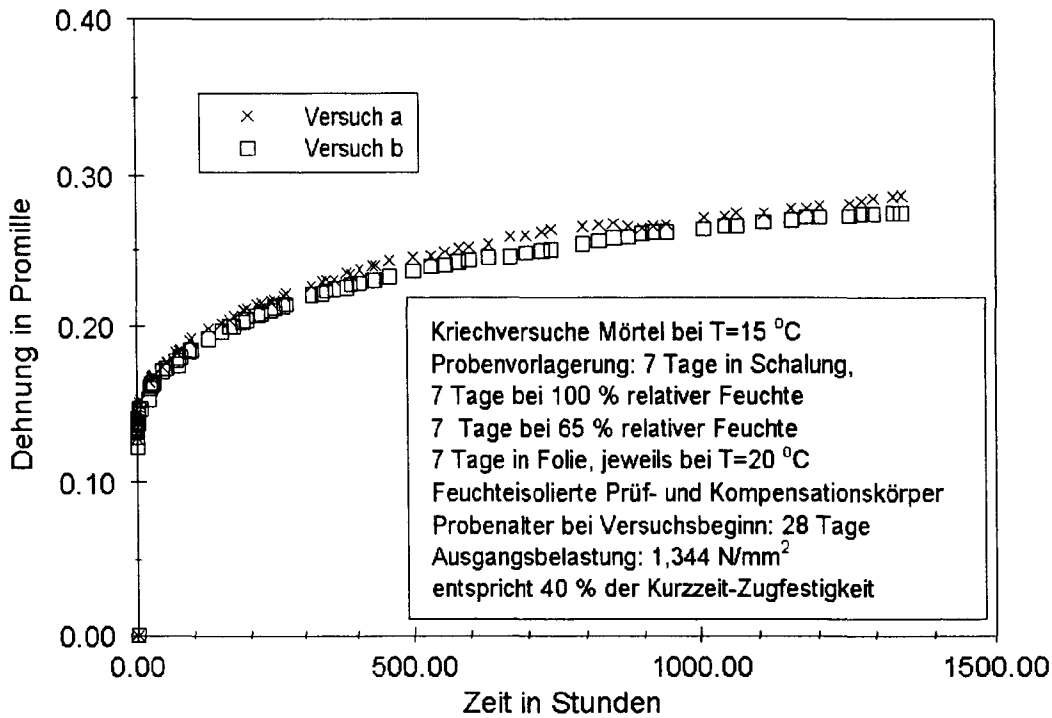


Abb. 10: Kriechverhalten des modifizierten HGJ-Mörtels. Fortsetzung Abb. 11.

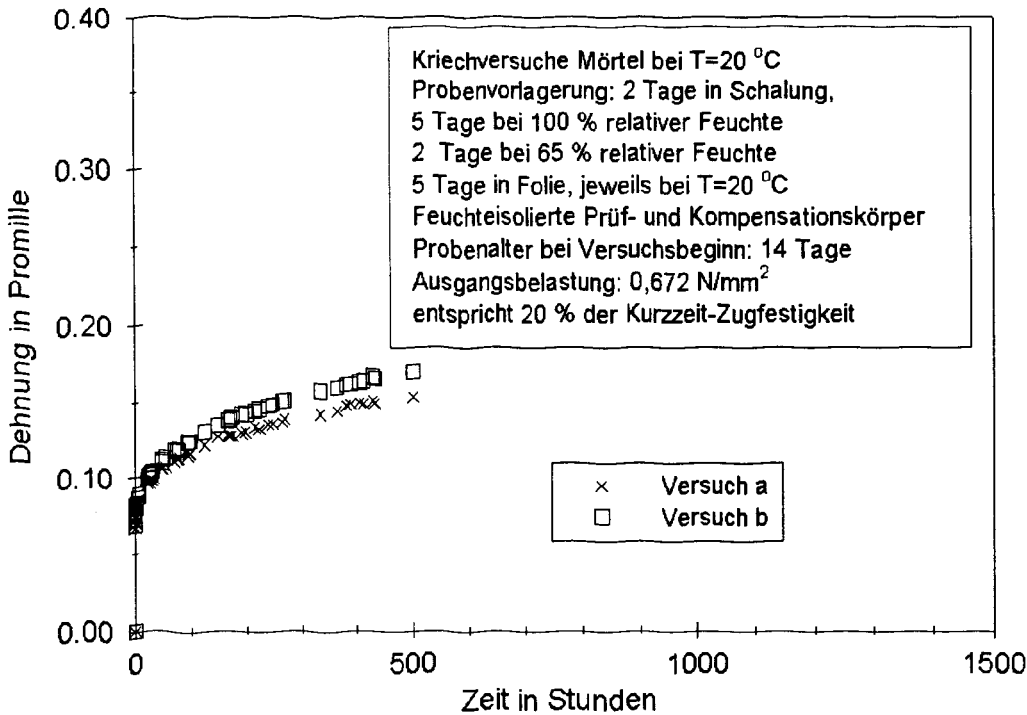


Abb. 11: Kriechverhalten des modifizierten HGJ-Mörtels.

Das FEM-Programm Ansys stellt u.a. folgende Gleichung zur Beschreibung von primärem Kriechen bzw. Relaxieren zur Verfügung.

$$\Delta \varepsilon_{cr} = C1 \cdot \sigma^{C2} \cdot \varepsilon^{C3} \cdot e^{-C4/T} \cdot \Delta t \quad (19)$$

Dabei bedeuten: C1 ... C4: anpaßbare Parameter, $\Delta \varepsilon_{cr}$: Kriechdehnung innerhalb eines Zeitschrittes, σ : Vergleichsspannung, ε : Vergleichsdehnung, T: Temperatur in K, Δt : Zeitdifferenz innerhalb des Zeitschrittes.

Unter Vernachlässigung des Temperatureinflusses wurde diese Gleichung an die durchgeführten Kriech- und Relaxationsversuche angepaßt. Für C3 konnte für alle Versuchsserien ein optimaler Wert von -4.0 ermittelt werden, für C2 6,0. Für Versuche mit Erstbelastungsalter von 7 Tagen betrug C1 $5 \cdot 10^{-25}$, bei einem Erstbelastungsalter von 14 Tagen betrug C1 $1 \cdot 10^{-25}$, bei einem Erstbelastungsalter von 28 Tagen betrug C1 $6 \cdot 10^{-26}$. Während bei allen Versuchen mit $T=293.15$ K dabei der Parameter $C4=0$ gesetzt wurde, betrug dieser Parameter bei $T=288.15$ K $C4=400$. Mit diesen Daten waren alle Zugkriech- und relaxationsversuche mit Ansys-Berechnungen zufriedenstellend wiederzugeben. Tastweise durchgeführte Druckkriechversuche waren jedoch nicht zu beschreiben, d.h. man kann aus Druckversuchen nicht auf das Verhalten unter Zug schließen.

5.2 Festigkeit und Verformungskennwerte als Funktion der Erhärtung des Mörtels

Um das mechanische Verhalten des Mörtels in Abhängigkeit von seinem Erhärtungszustand beschreiben zu können wurde die Prismendruck- und -biegezugfestigkeit, die axiale Zugfestigkeit,

die Dehnung bei Zug-Höchstlast sowie der E-Modul und die Querdehnzahl in Abhängigkeit vom Mörtelalter und der Erhärtungstemperatur untersucht. Es wurden zwei Prüfserien bei 20 und 7 °C verwendet. Der E-Modul wurde als statischer Sekantenmodul zwischen 5 und 55 % der Höchstlast im Zugversuch bestimmt. Die Querdehnzahl wurde bei 55 % der Höchstlast im Zugversuch ermittelt. Aus den Versuchen konnte folgende Reifeformel für den Mörtel abgeleitet werden:

$$R = t \cdot (T - 1,5 \text{ °C}) - 35 \text{ °C d} \quad (20)$$

R-Reifegrad in °C·Tagen, t-Alter in Tagen, T-Temperatur in °C

Diese Reifeformel unterscheidet sich z.B. von der bekannten Saulschen Formel. Die Unterschiede sind experimentell begründet. So ergab sich der Term 1,5 °C aus der Beobachtung der Festigkeitsentwicklung bei 2 verschiedenen Temperaturen. Im Gegensatz zu einem Beton kommt die Erhärtung einer dünnen Mörtelschicht aufgrund der hohen Wärmeabfuhr schon bei viel höheren Temperaturen zum Erliegen. Der Term 35 °C d ist darin begründet, daß die Festigkeitsentwicklung des Mörtels im wesentlichen ab diesem Reifegrad einsetzt. Über nichtlineare Regressionsrechnungen wurden die folgenden Gleichungen abgeleitet, die die Abhängigkeit der Festigkeiten, der Dehnung bei Zug-Höchstlast, des E-Moduls und der Querdehnzahl vom Reifegrad bei optimalen Erhärtungsbedingungen beschreiben:

$$\text{Axiale Zugfestigkeit in N/mm}^2 = \text{Reifegrad}^{0,25} \cdot 0,66 \quad (21)$$

$$\text{Druckfestigkeit in N/mm}^2 = \text{Reifegrad}^{0,36} \cdot 5,96 \quad (22)$$

$$\text{Biegezugfestigkeit in N/mm}^2 = \text{Reifegrad}^{0,36} \cdot 1,03 \quad (23)$$

$$\text{Dehnung bei Höchstlast in Promille} = \text{Reifegrad}^{-0,33} \cdot 1,64 \quad (24)$$

$$\text{Stat. Zug-E-Modul in N/mm}^2 = \text{Reifegrad}^{0,37} \cdot 1339 \quad (25)$$

$$\text{Querdehnzahl} = \text{Reifegrad}^{-0,11} \cdot 0,34 \quad (26)$$

Die folgenden Abbildungen 12-14 zeigen die o.g. Parameter als Funktion des Reifegrades nach Gl. 20. Abbildung 15 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Linie des Mörtels bei verschiedenen Reifegraden nach Gl. 20.

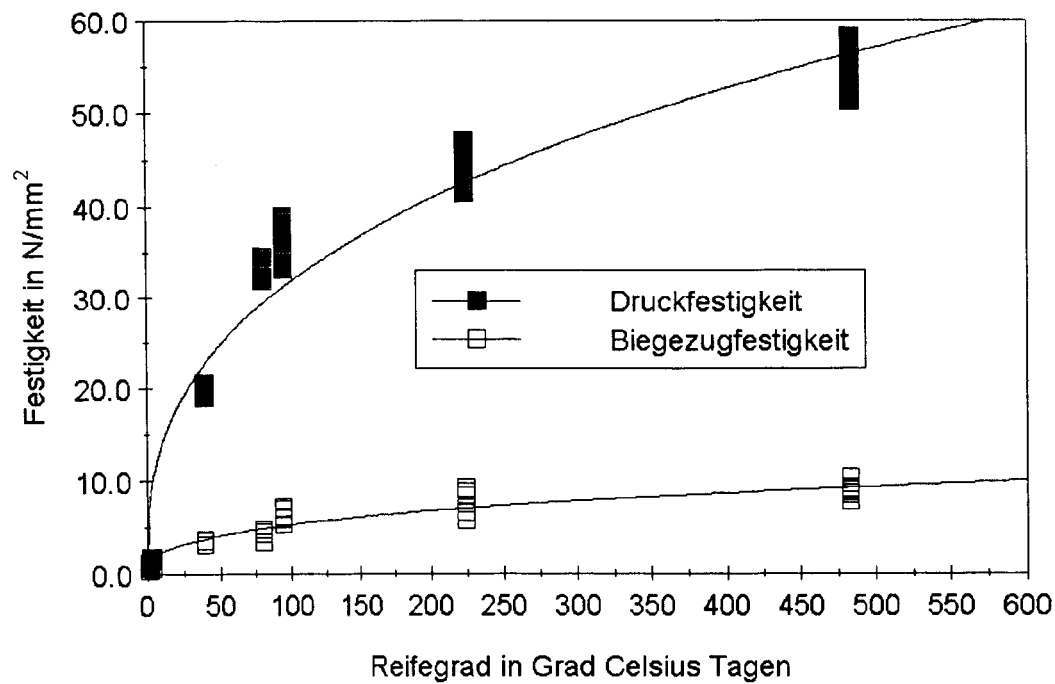


Abb. 12: Druck- und Biegezugfestigkeit des Mörtels als Funktion des Reifegrades nach Gl. 20 mit eingezeichneten Kurven der nichtlinearen Regression.

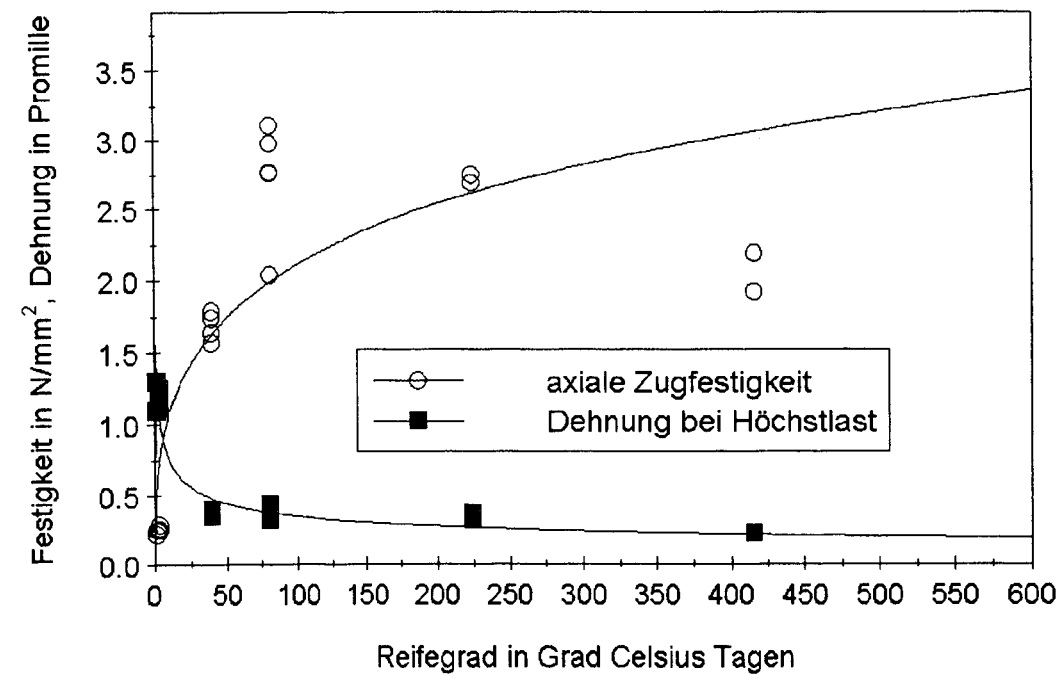


Abb. 13: Axiale Zugfestigkeit und Dehnung bei Höchstlast des Mörtels als Funktion des Reifegrades nach Gl. 20 mit eingezeichneten Kurven der nichtlinearen Regression.

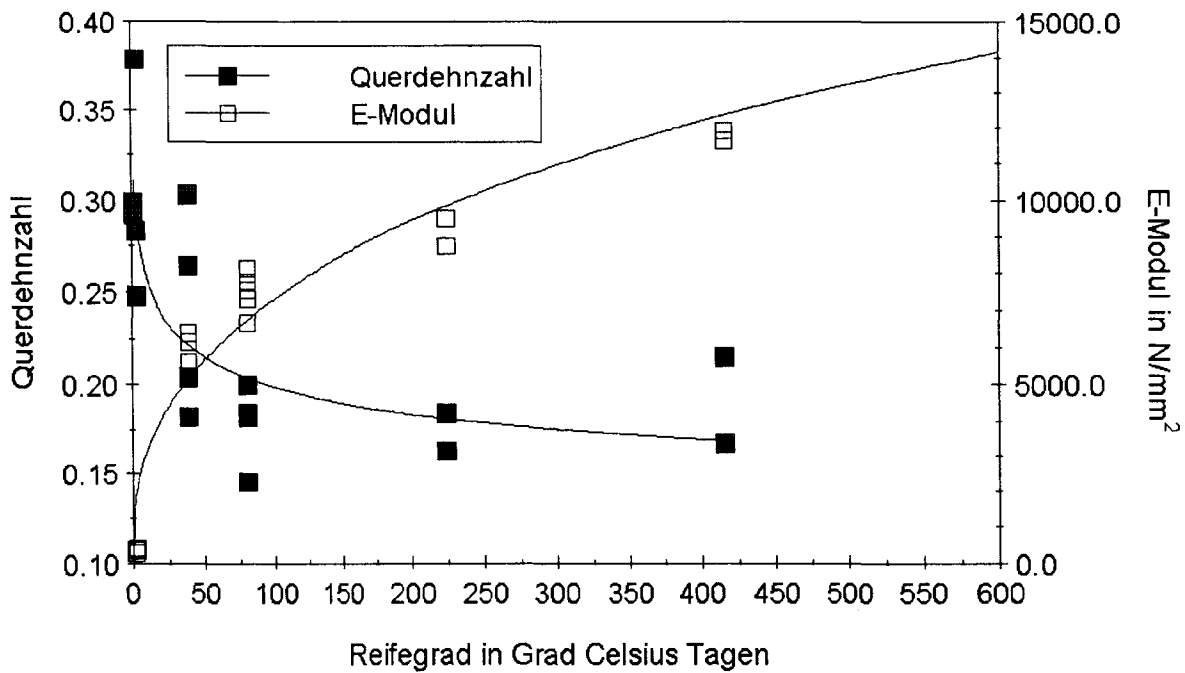


Abb. 14: Querdehnzahl und E-Modul als Funktion des Reifegrades nach Gl. 20 mit eingezeichneten Kurven der nichtlinearen Regression.

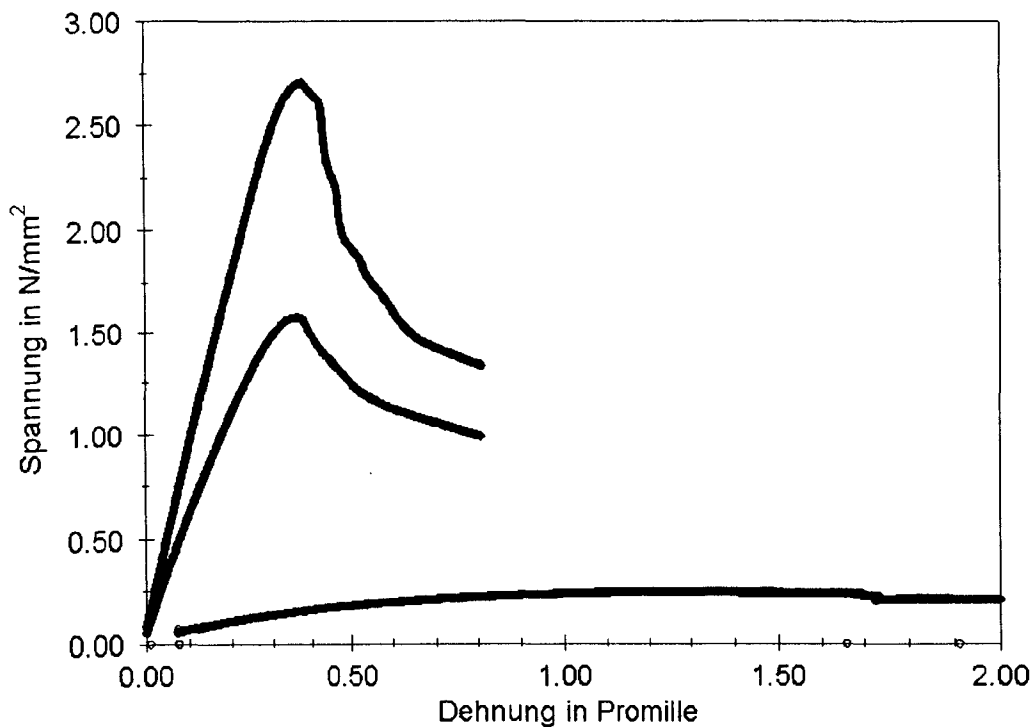


Abb. 15: Spannungs-Dehnungs-Linien bei axialer Zugbeanspruchung des Mörtels im Alter von 7 Tagen bei 7°C Lagerungstemperatur (Reifegrad 3,5 nach Gl. 20), 4 Tagen bei 20°C Lagerungstemperatur (Reifegrad 39) und 14 Tagen bei 20°C Lagerungstemperatur (Reifegrad 224).

5.3 Bestimmung der Sorptionsisothermen der Baustoffe

Die folgenden Abbildungen 15-17 zeigen die experimentell gemessenen Sorptionsisothermen der untersuchten Baustoffe. Die dargestellte Sorptionsisotherme des Mörtels steht allerdings im Widerspruch zur Messung der maximalen freien Wasseraufnahme von $24 \pm \text{Vol.}\%$. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist die Sorptionsisotherme fehlerhaft, da auch andere Porositätsdaten auf eine allgemein kleinere Porosität hinweisen, als sie in der Isotherme dargestellt ist. Worauf der Fehler zurückzuführen ist, ließ sich nicht mehr nachvollziehen. Da die Bestimmung von Sorptionsisothermen sehr zeitaufwendig ist, wurde die Messung nicht wiederholt, sondern die Werte der dargestellten Sorptionsisotherme mit einem konstanten Faktor multipliziert, so daß sie bei $u_f=26 \text{ Vol.}\%$ endet. Bis zu 75 % r.F. wurden die experimentell gemessenen Werte den in der Feuchtetransportberechnung angesetzten Isothermen zugrundegelegt, darüber die in den Abbildungen gezeigte Funktion nach /7/, Gleichung 7.

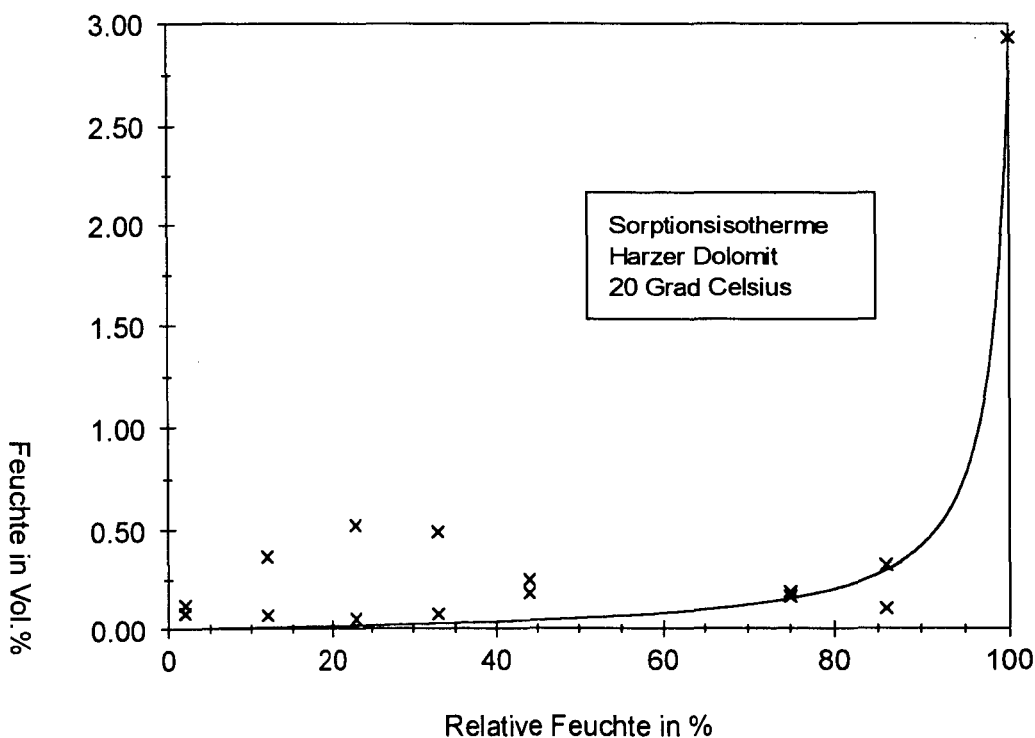


Abb. 16: Sorptionsisotherme des Harzer Dolomits (Messung A. Rinne). Durchgezogene Linie nach Gl. 7. aus /7/.

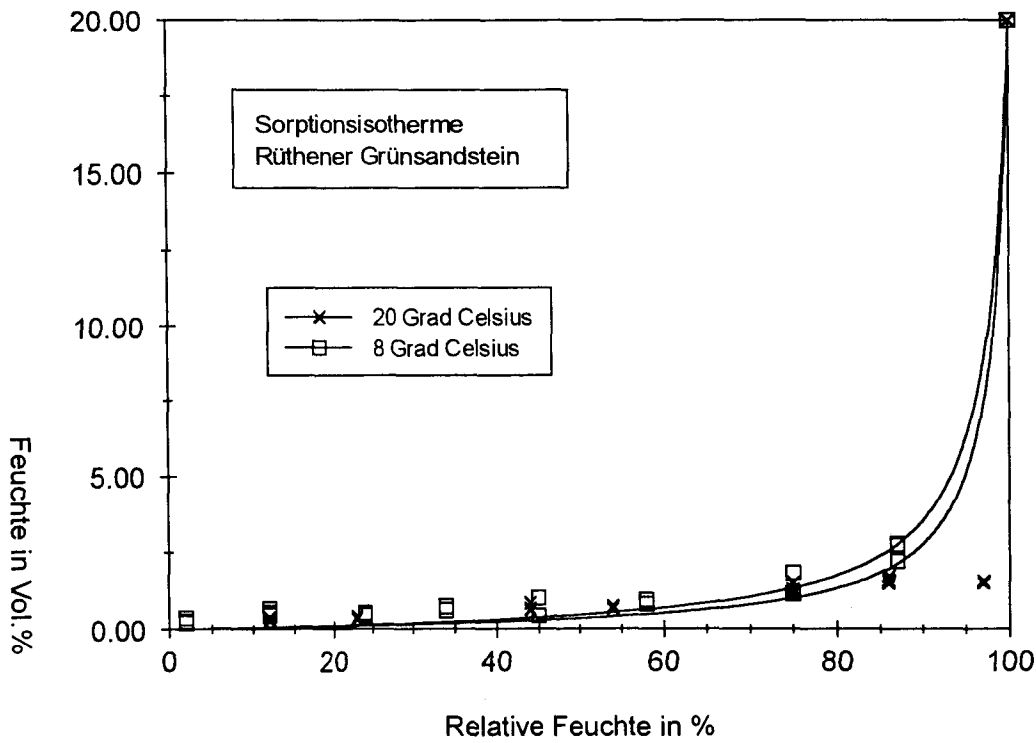


Abb. 17: Sorptionsisotherme des Rütthener Grünsandsteins (Messung A. Rinne). Durchgezogene Linie nach Gl. 7. aus /7/, ohne Berücksichtigung des Wertes bei 97 % r.F.

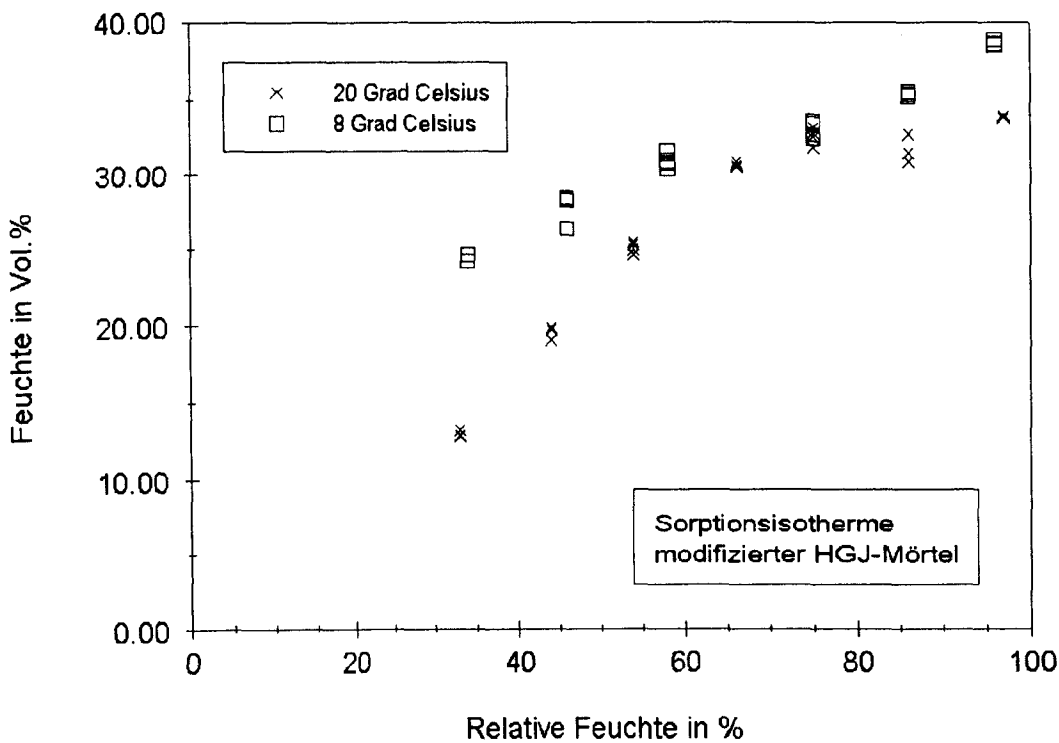


Abb. 18: Sorptionsisotherme des HGJ-Mörtels (Messung A. Rinne) (fehlerhaft).

5.4 Schwinden und Quellen des Mörtels

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis von Schwindmessungen an HGJ-Normmörtelprismen. Drei Mörtelproben wurden bei 100 % relativer Feuchte gelagert, 3 Proben bei 65 % relativer Feuchte, jeweils bei 20 °C. Die Proben wurden mit einer mechanischen Schwindmessapparatur vermessen, die drei bei 65 % r.F. gelagerten Proben zusätzlich über eine Messung mit DMS, mit guter Übereinstimmung. Schwankungen im Schwindverlauf bei Lagerung bei 65 % r.F. sind auf Unregelmäßigkeiten des Klimaraums zurückzuführen.

Das Endschwindmaß des Mörtels wurde bei 100% r.F. zu 0,1 Promille, bei 65 % r.F. zu 8,6 Promille bestimmt. Andere Endschwindmaße wurden mit folgender Gleichung linear inter- bzw. extrapoliert:

$$\text{Lineares Endschwindmaß in Promille} = \text{relative Feuchte in Prozent} \cdot -0,2429 + 24,29 \quad (27)$$

Die gemessenen Schwindmaße sind für einen modifizierten HGJ-Mörtel sehr groß. Worauf dies zurückzuführen ist, blieb unklar. Eventuell hatten die verwendeten Komponenten des Mörtels ein zu hohes Alter, so daß die Quellkomponente des Mörtels nicht mehr ausreichend wirksam wurde.

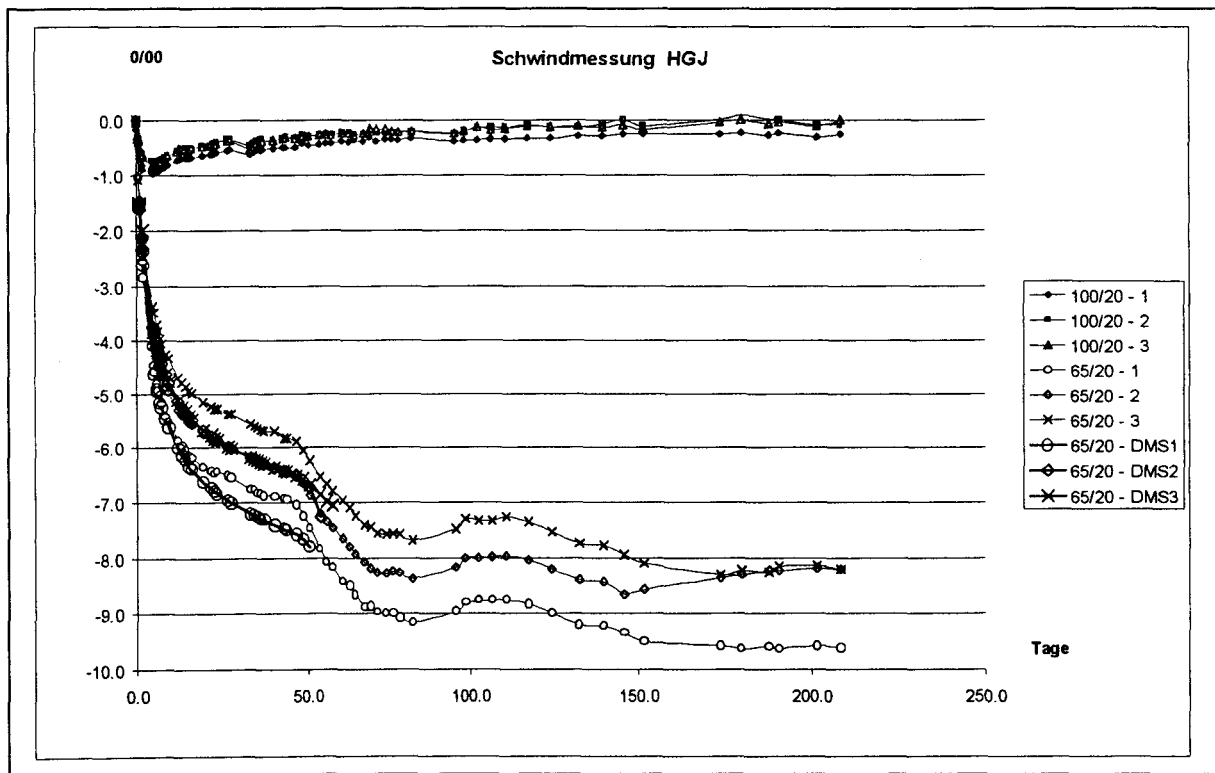


Abb. 19: Schwinden und Quellen des Mörtels

6. Überprüfung von Forschungs- und Ingenieurmodell

Zur Überprüfung des Forschungs- bzw. Ingenieurmodells wurden zwei Typen von Versuchen verwendet. Zum einen wurden geometrisch gut definierte gezwängte Zwei-Stein-Körper mit Mörtelfuge ein- oder zweiseitig konstanten klimatischen Randbedingungen ausgesetzt und die Temperatur- und Feuchteprofile sowie die Rißbildungen und Verformungen in Stein, Fuge und über die Fuge hinweg untersucht. Zum anderen wurde eine dreischalige Probewand erstellt die der freien Witterung ausgesetzt wurde und in analoger Weise untersucht werden. Im einen Fall lagen somit Versuchsergebnisse unter relativ konstanten, genau definierten Randbedingungen vor, im anderen Fall Ergebnisse an einem realistischen Mauerwerksausschnitt unter natürlichen Witterungsbedingungen. Diese Versuche wurden dann rechnerisch simuliert und die Ergebnisse den Meßdaten gegenüber gestellt.

6.1 Versuche an gezwängten Zwei-Stein-Körpern und Vergleich mit berechneten Ergebnissen

Abb. 20 zeigt einen Teil der Stände mit denen die Versuche an Zwei-Stein-Körpern durchgeführt wurden. Sie bestehen aus einem sehr steifen Stahlrahmen. Um außerdem Temperaturverformungen zu vermeiden wurden die doppelwandigen, von Wasser durchflossenen Rahmenstiele mit Hilfe eines Heiz-Kühlthermostats auf konstanter Temperatur gehalten. Insgesamt wurden 6 dieser Rahmen gebaut, so daß pro Natursteinsorte bis zu 3 Parallelproben untersucht werden konnten.

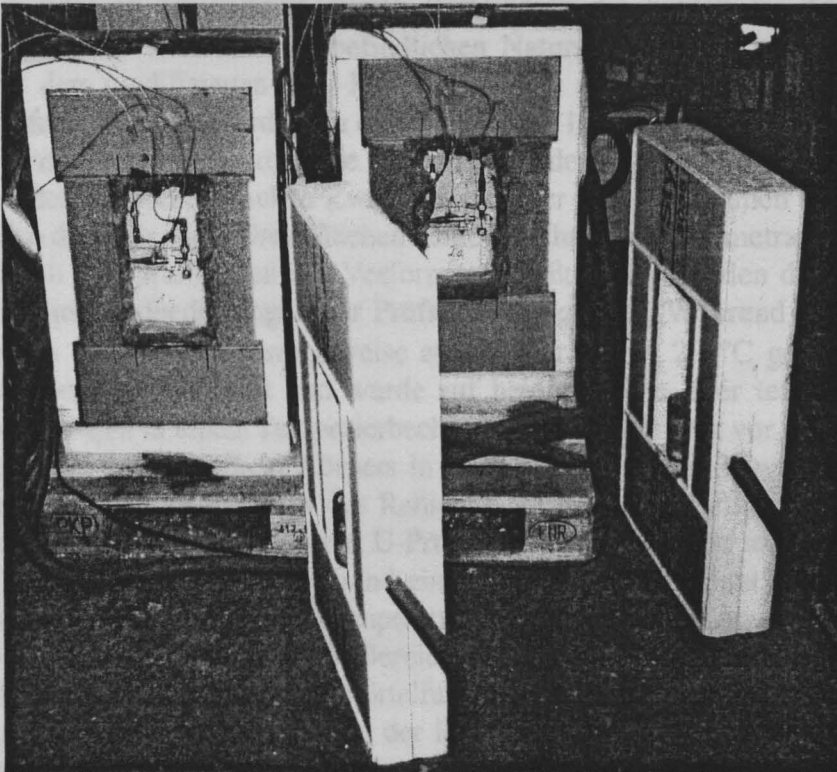


Abb. 20: Prüfraumen für Versuche mit Zwei-Stein-Körpern

Abbildung 21 zeigt fünf der sechs Stände während eines Versuchs mit einseitig natürlicher Bewitterung (ohne Schlagregen). Daneben befindet sich die automatische Meßstation zur Aufnahme

der Klimarandbedingungen und der Meßschrank, in dem die Data-Logger und Thermostate untergebracht waren.

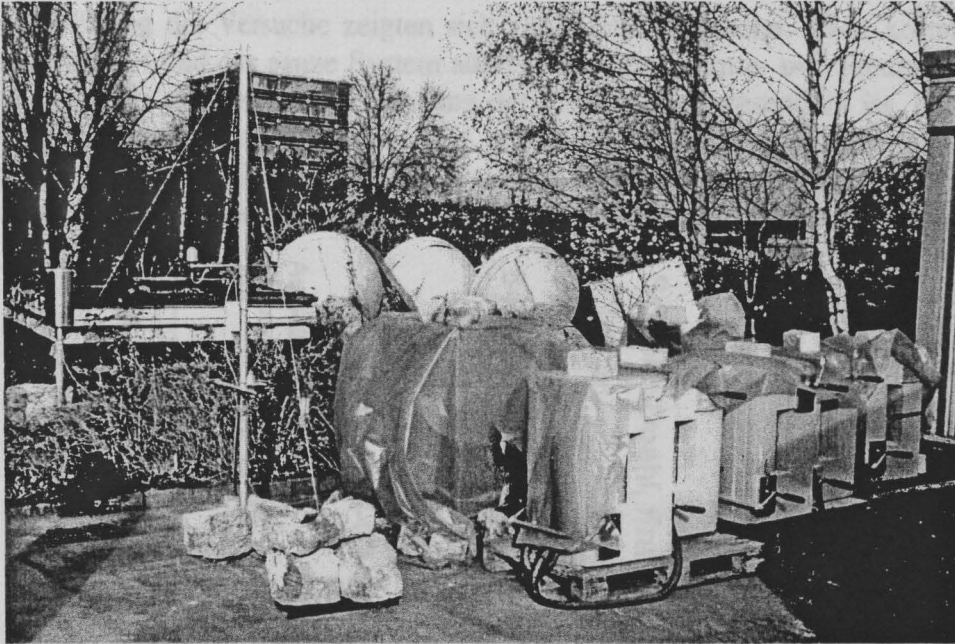


Abb. 21: Prüfraumen für Versuche mit Zwei-Stein-Körpern im Außengelände mit Meßschrank und Klimameßstation.

Zunächst wurden in die vortemperierten Prüfraumen die beiden im Temperatur- und Feuchtegleichgewicht (65 % r.F./20 °C) befindlichen Natursteine eingeklebt und nach Erhärtung des Klebers mit dem modifizierten HGJ-Mörtel mit Hilfe eines Stopfraumens verfügt. In die 16 cm tiefe Mörtelfuge wurden außerdem in einer Tiefe von 1, 8 und 15 cm Thermoelemente eingemörtelt. Nach dem Vermörteln wurden die Seitenflächen der Zwei-Stein-Körper mit Epoxidharz abgedichtet und der Freiraum zwischen Zwei-Stein-Körper und Prüfraumen mit Wärmedämmmaterial aufgefüllt, so daß über diese Grenzflächen keine Feuchte- und Wärmetransportprozesse stattfinden konnten. Nach dem Aufbringen der Verformungsmeßtechnik wurden die Zwei-Stein-Körper den jeweiligen Klimarandbedingungen der Prüfserien ausgesetzt. Während der Klebe- und Stopfvorgänge wurden die Steine näherungsweise auf 65 % r.F. und 20 °C gehalten. Der gesamte Versuchsaufbau war wärmeisoliert und wurde auf beiden Seiten über temperierte Feuchtelösungen klimatisiert, die sich in einem Temperierbecher in einem Luftraum vor den Steinflächen befanden. Die Verformung des Zwei-Stein-Körpers in y-Richtung (s. Abb. 3) wurde durch die vollflächige Verklebung mit den Querhäuptern des Rahmens behindert. Auf einer Seite („Innenseite“) waren die Steine außerdem an jeweils einem U-Profil gestoßen. Dadurch wurde eine Ausdehnung in x-Richtung (s. Abb. 3) behindert, während ein Zusammenziehen nicht behindert wurde. Durch die Austrocknung des Mörtels und die Temperaturrandbedingungen kam es im gezwängten System zu Zugspannungen mit Rißbildungen im Bereich der Mörtelfuge. Die Verformungen an der „Außenseite“ und die Temperaturen in der Mörtelfuge wurden kontinuierlich vermessen, die Rißbildung wurde einmal pro Woche nach Öffnen der Rahmen untersucht, der Feuchtegehalt in Mörtel und Stein wurde einmal am Ende jeder Versuchserie gravimetrisch durch Ausbohren von Bohrmehl in verschiedenen Tiefen von Stein und Mörtel untersucht. Die Bohrungen wurden im Mörtel mittig eingebracht, im Stein ca. 1,5 bis 2 cm über der Fuge. Abbildung 22 zeigt die Verformungsmeßtechnik. Jeweils längs der Fuge, über die Fuge hinweg und im Stein wurde ein induktiver Wegaufnehmer angebracht.

Mit diesen Rahmen wurden drei Versuchsserien, jeweils mit Harzer Dolomit und Rüthener Grünsandstein als Naturstein durchgeführt, deren Parameter in Tabelle 5 aufgeführt sind.

Bei der Durchführung der Versuche zeigten sich zahlreiche Probleme. Zwar konnten die Stahlrahmen gut temperiert und das ganze System ausreichend gut wärme- und feuchteisoliert werden was für eine konstante und definierte Zwängung der Probekörper wesentlich ist. Die angestrebten Klimarandbedingungen in den Versuchsserien 1 und 2 konnten jedoch nur sehr bedingt eingehalten werden. Die Wärmetauscherflächen waren viel zu klein. Es zeigte sich, daß die beantragten und genehmigten Mittel für den Bau dieser Stände zu gering waren um hier eine gute Lösung zu realisieren. Im Ergebnis lässt sich deshalb die Versuchsserie 1 charakterisieren durch geringe Unterschiede in den relativen Feuchte und etwa 2 Grad Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten der Prüfkörper. In Serie 2 konnten praktisch keine Unterschiede in Temperatur und Feuchte auf beiden Seiten der Proben realisiert werden, so daß hier i.w. ein symetrisches Austrocknen der Proben stattfand. Serie 3 mit natürlicher Bewitterung auf einer Probenseite und Konstantklima auf der anderen Seite ist mit Ausnahme einiger Ausfälle der Temperierung gut gelungen.

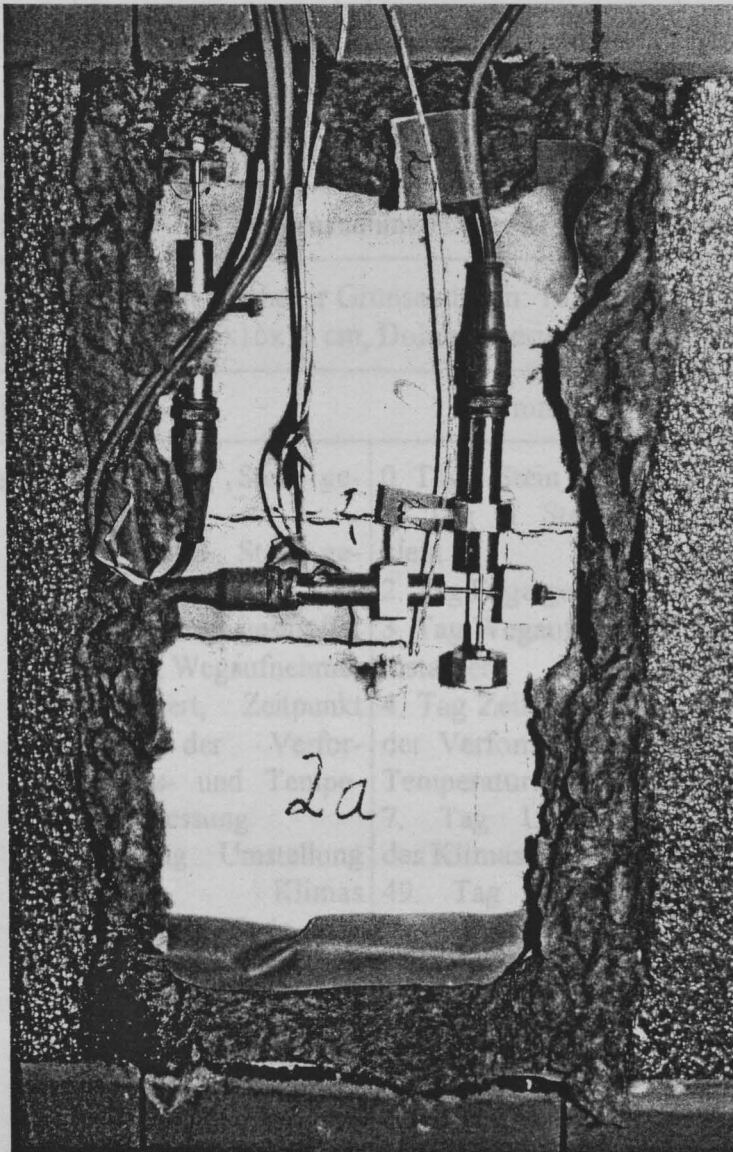


Abb. 22: Verformungsmeßtechnik an den Zwei-Stein-Körpern mit eingezeichneter Rißbildung im Fugenbereich.

Tab. 5: Parameter der Versuche mit Zwei-Stein-Körpern

	Serien 1a und 1b	Serien 2a und 2b	Serien 3a und 3b
1. Klimarandbedingung („Außenseite“)	Angestrebt: 87 % r.F. über gesättigter KCl-Lösung, gemessen: 76 % r.F. 17 °C Lufttemperatur	Angestrebt: 87 % r.F. über gesättigter KCl-Lösung, gemessen: 76 % r.F. 19 °C Lufttemperatur	Natürliche Bewitterung ohne Schlagregen, Einmaliges Besprühen der Außenseite mit Wasser
2. Klimarandbedingung („Innenseite“)	Angestrebt: 75 % r.F. über gesättigter NaCl-Lösung, gemessen: 69 % r.F. 19 °C Lufttemperatur	Angestrebt: 75 % r.F. über gesättigter NaCl-Lösung, gemessen: 76 % r.F. 19,8 °C Lufttemper.	Angestrebt: 75 % r.F. über gesättigter NaCl-Lösung, gemessen: 75 % r.F. 17 °C Lufttemperatur
Ausgangszustand der Natursteine	Gleichgewichtsfeuchte 65 % r.F. / 20 °C	Gleichgewichtsfeuchte 65 % r.F. / 20 °C	Gleichgewichtsfeuchte 65 % r.F. / 20 °C
Vornässen der Steine	Kein Vornässen	5 Minuten besprühen	5 Minuten besprühen
Dicke der Mörtelfuge	2,4 cm, Ausnahme Harzer Dolomit in Serie 1: 4,4 cm		
Abmessungen der Natursteine (H,B,T)	Gesägt, Rühthener Grünsandstein: 16x16x16 cm, Dolomit Serie 1: 15x16x16 cm, Dolomit Serien 2 und 3 16x15x16 cm		
Dicke der Klebefugen	3 mm		
Ablauf des Versuchs	0. Tag 1. Stein geklebt 1. Tag 2. Stein geklebt 2. Tag Fuge gestopft 3. Tag Wegaufnehmer installiert, Zeitpunkt Null der Verformungs- und Temperaturmessung 6. Tag Umstellung des Klimas 42. Tag Ende des Versuchs, Feuchtemessung	0. Tag 1. Stein geklebt 1. Tag 2. Stein geklebt 2. Tag Fuge gestopft 3. Tag Wegaufnehmer installiert 4. Tag Zeitpunkt Null der Verformungs- und Temperaturmessung 7. Tag Umstellung des Klimas 49. Tag Ende des Versuchs, Feuchtemessung	0. Tag 1. Stein geklebt 1. Tag 2. Stein geklebt 2. Tag Fuge gestopft 3. Tag Wegaufnehmer installiert 4. Tag Umstellung des Klimas, Zeitpunkt Null der Verformungs- und Temperaturmessung 39. Tag Einsprühen der Außenseiten 5 Minuten mit Wasser 39. bis 41. Tag Ausfall der Temperierung 59. Tag Ende des Versuchs, Feuchtemessung

Abbildung 23 zeigt das für die Versuche mit Zwei-Stein-Körpern verwendete Ortselement- bzw. FE-Netz der Programme Transreac und Ansys mit den Verformungsrandbedingungen. Abweichend von den experimentellen Bedingungen wurde an der Querstrebe der „Innenseite“ eine in x- und y-Richtung unverschiebliche Lagerung angenommen. Dies hat keine signifikanten Auswirkungen auf die Verschiebungen und Spannungen in y-Richtung auf der „Außenseite“, die für die hier vorliegende Fragestellung relevant sind. In Transreac wurden außerdem auf beiden Proben-seiten noch Ortselemente angekoppelt, an denen die Feuchte- und Temperaturrandbedingungen eingestellt wurden (Luft).

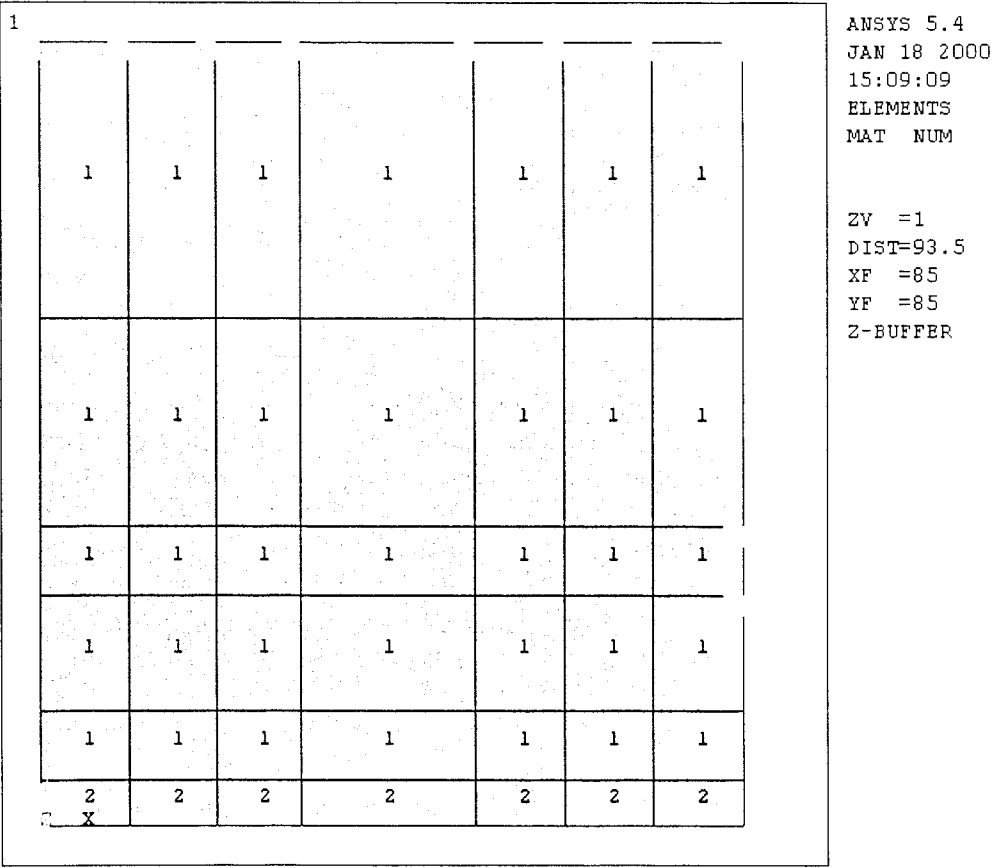


Abb. 23: Ortselement- bzw. FE-Netz der Programme Transreac (Ausschnitt) und Ansys für die Simulation der Versuche mit Zwei-Stein-Körpern.

Im folgenden werden die Ergebnisse der Versuche und die entsprechenden berechneten Daten aufgezeigt und gegenübergestellt. Das Ingenieurmodell ist nicht auf die Bildung von Rissen normal zur Fuge in den Versuchen mit Zwei-Stein-Körpern anwendbar, da in diesem Fall keine vollständige Zwängung in Fugenlängsrichtung vorlag. Die Aussagen zur Gültigkeit des Ingenieurmodells beschränken sich deshalb in diesem Falle auf die Bildung von Flankenrissen. Die experimentell gemessenen Dehnungen längs der Mörtelfuge werden nicht zu Vergleichszwecken herangezogen, da sie aus den zweidimensionalen Simulationsberechnungen nicht hervorgehen.

Die Darstellung beginnt mit den den Zwangsspannungen zugrundeliegenden Temperatur- und Feuchteänderungen. Sie geht dann über die Verformungen zu den beobachteten Rissen bzw. den berechneten Spannungen.

6.1.1 Veränderungen der Temperatur

Die folgenden Abbildungen zeigen die Temperaturveränderungen während der Versuche und entsprechende berechnete Daten. Die experimentellen Daten wurden mit Thermoelementen vom Typ K gemessen. Bedeutende Abweichungen zwischen Experiment und Berechnung liegen nicht vor. Beim Anfahren der angestrebten Temperatur in Versuchsserie 1 wurde der gemessene Temperaturverlauf in der Luft den Berechnungen als Randbedingung zugrundegelegt (keine spontane Einstellung der angestrebten Temperatur). Die zu beobachtenden Abweichungen zwischen Experiment und Berechnung sind zumeist darauf zurückzuführen, daß in den Berechnungen mit vereinfachten, d.h. zeitweilig konstanten Randbedingungen gearbeitet wurde, während im Experiment niemals wirklich konstante Temperaturen vorliegen. Starke Temperaturabfälle während der Versuchsserie 3 sind auf kurzfristige Ausfälle der Temperierung der Stände zurückzuführen. In einem Fall wurde versucht diesen Ausfall der Temperierung nachzusimulieren. Der leichte zeitliche Versatz dieses Ereignisses in Experiment und Berechnung ist für das Ergebnis ohne Belang. Der Beginn der experimentellen Kurven zeigt jeweils die Umstellung der Klimarandbedingungen von der Vorlagerung auf die Versuchsbedingungen an.

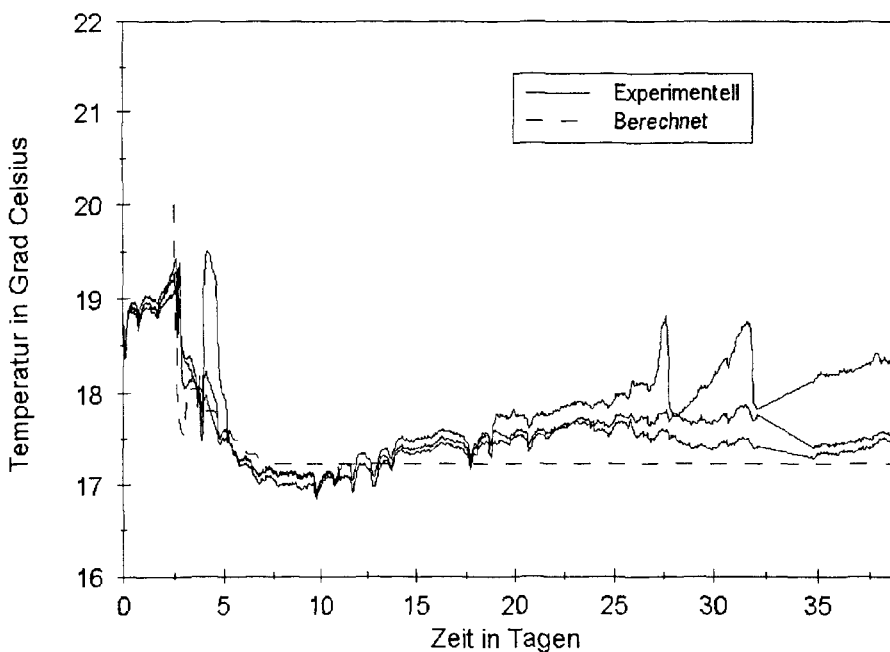


Abb. 24: Temperaturen während der Versuchsserie 1a mit Harzer Dolomit, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Außenseite“ gemessen.

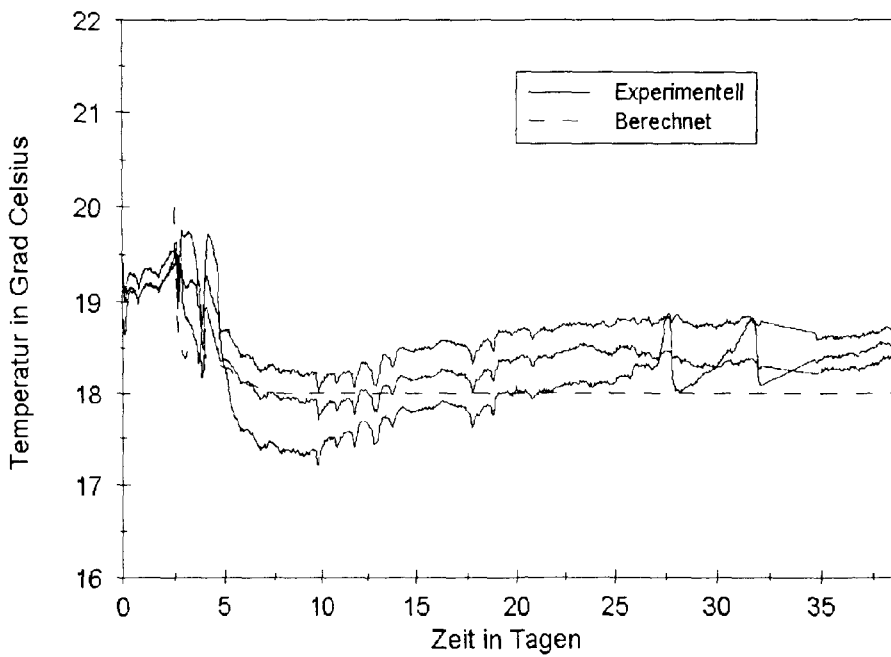


Abb. 25: Temperaturen während der Versuchsserie 1a mit Harzer Dolomit, Mitte der Mörtelfuge.

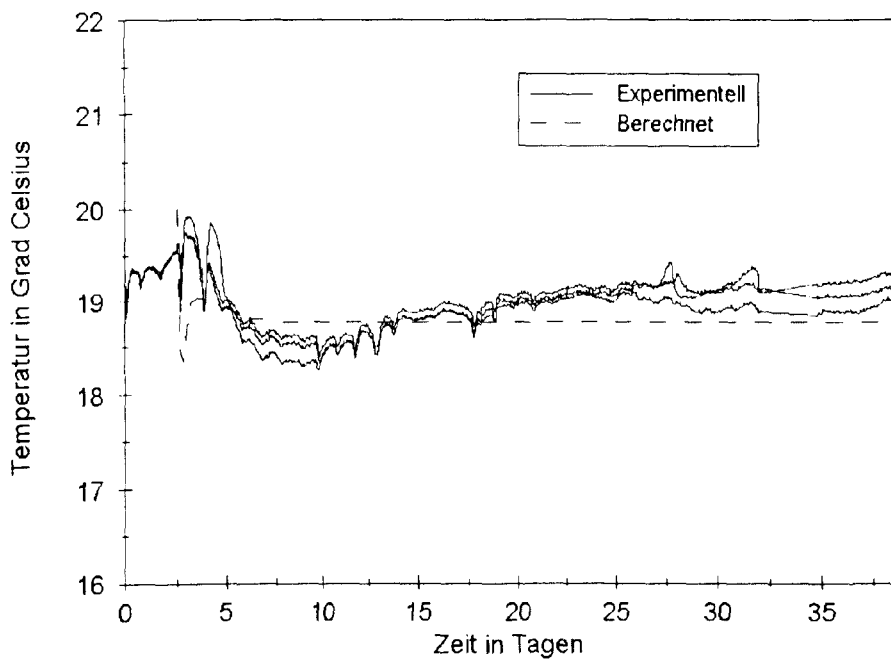


Abb. 26: Temperaturen während der Versuchsserie 1a mit Harzer Dolomit, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Innenseite“ gemessen.

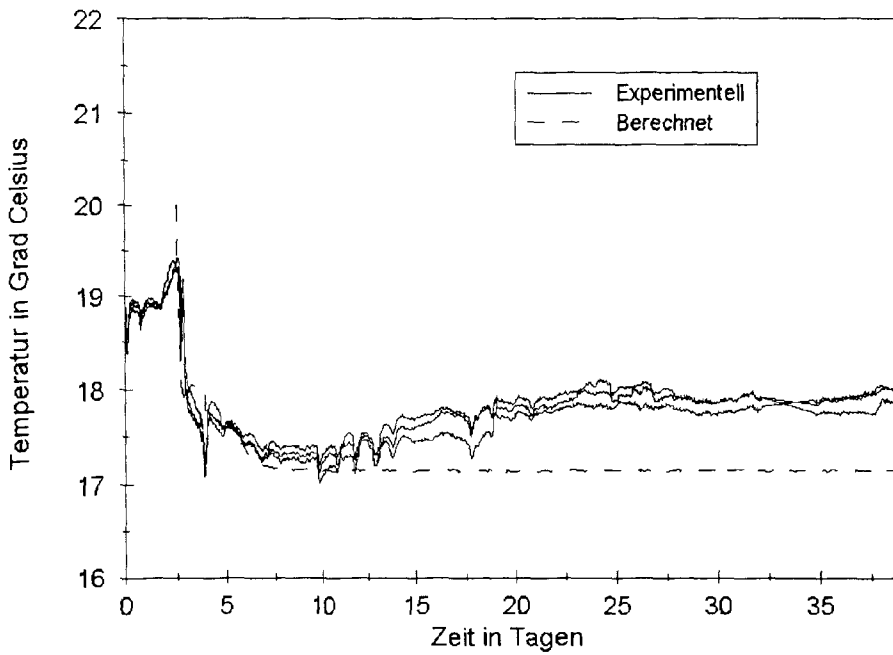


Abb. 27: Temperaturen während der Versuchsserie 1b mit Rühener Grünsandstein, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Außenseite“ gemessen.

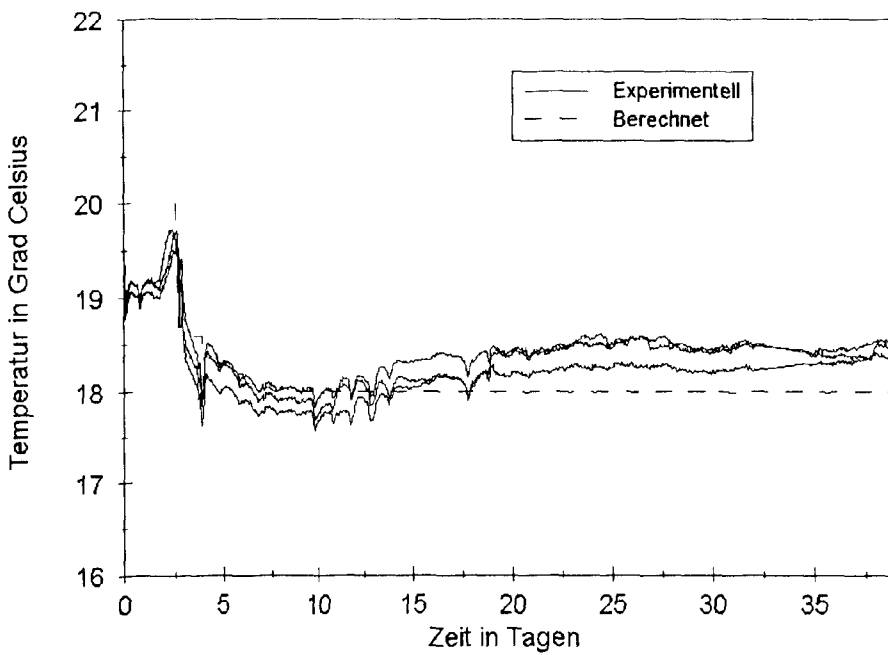


Abb. 28: Temperaturen während der Versuchsserie 1b mit Rühener Grünsandstein, Mitte der Mörtelfuge.

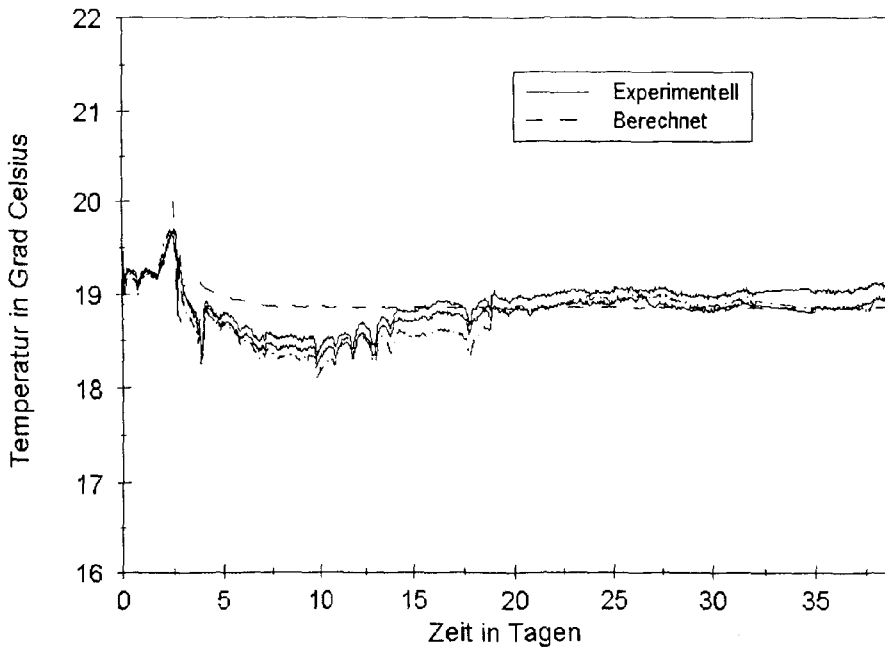


Abb. 29: Temperaturen während der Versuchsserie 1b mit Rüthener Grünsandstein, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Innenseite“ gemessen.

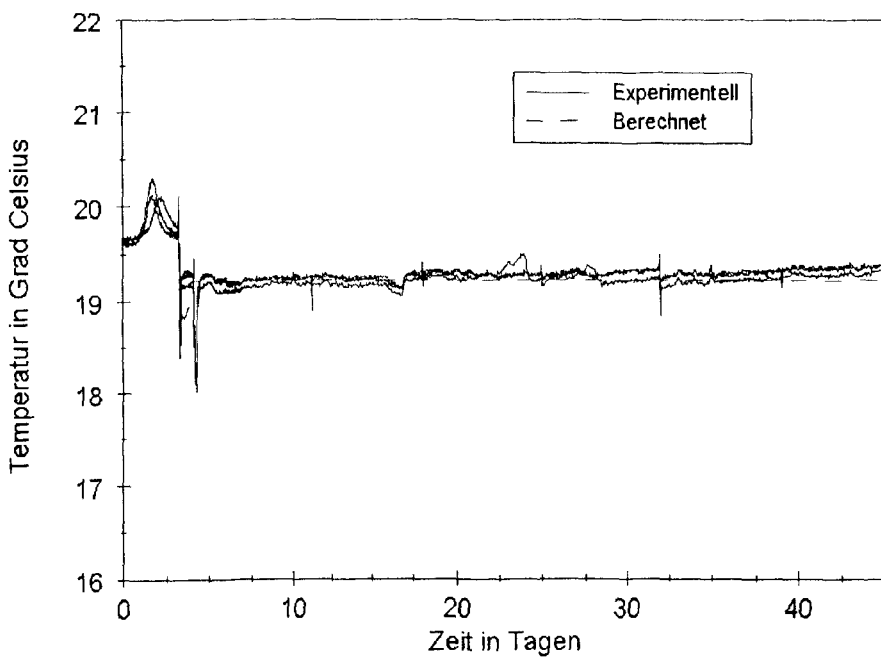


Abb. 30: Temperaturen während der Versuchsserie 2a mit Harzer Dolomit, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Außenseite“ gemessen.

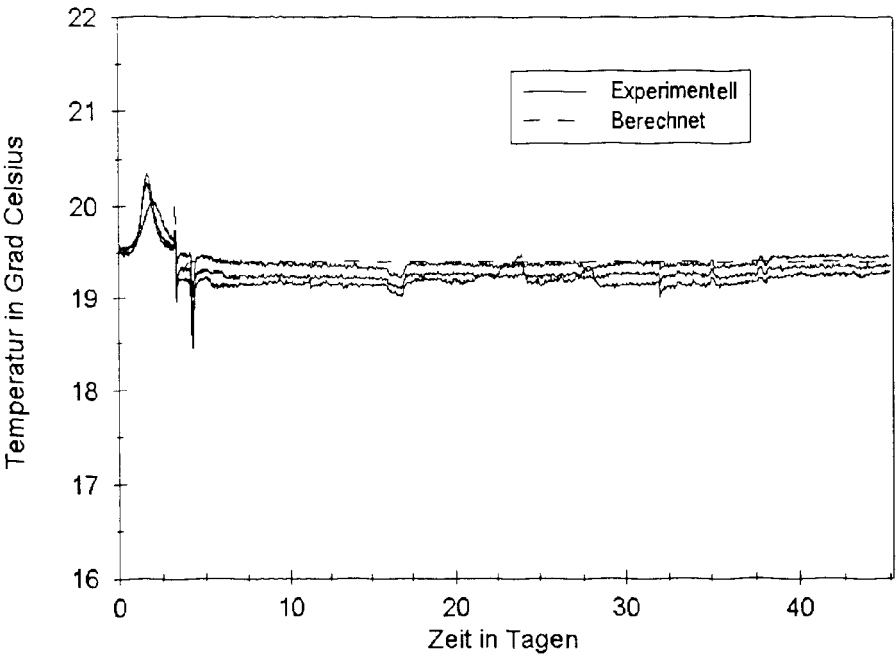


Abb. 31: Temperaturen während der Versuchsserie 2a mit Harzer Dolomit, Mitte der Mörtelfuge.

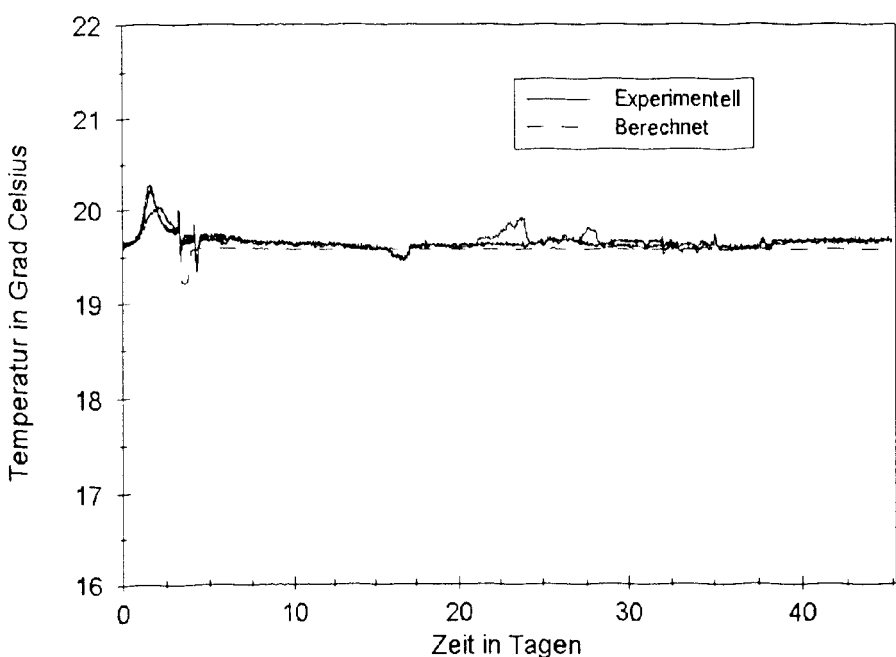


Abb. 32: Temperaturen während der Versuchsserie 2a mit Harzer Dolomit, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Innenseite“ gemessen.

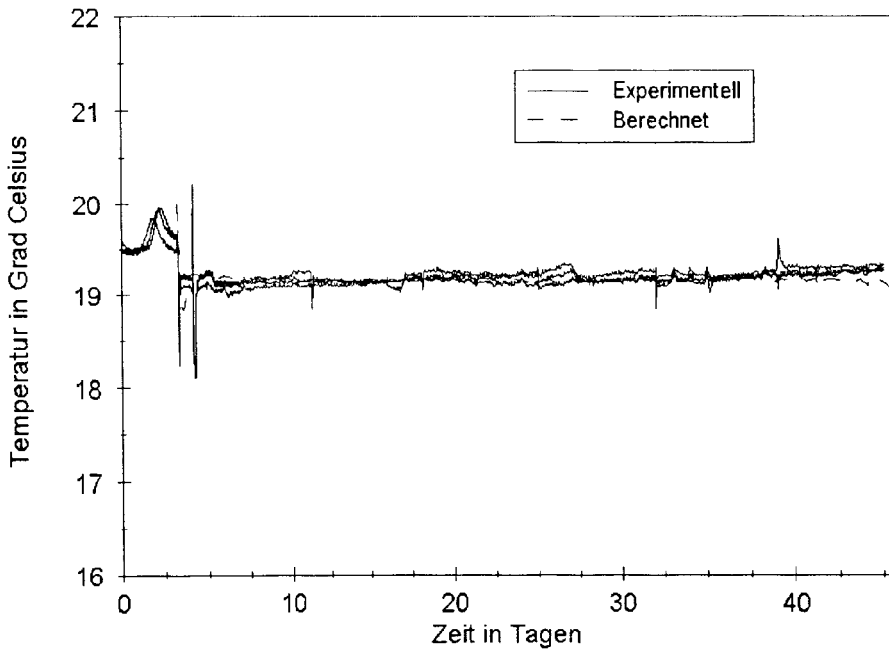


Abb. 33: Temperaturen während der Versuchsserie 2b mit Rühener Grünsandstein, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Außenseite“ gemessen.

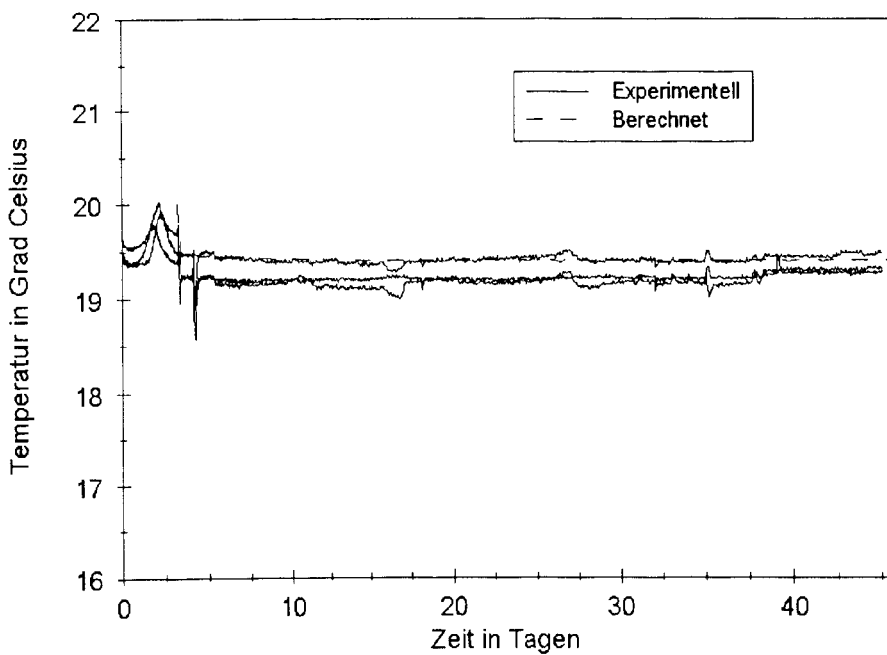


Abb. 34: Temperaturen während der Versuchsserie 2b mit Rühener Grünsandstein, Mitte der Mörtelfuge.

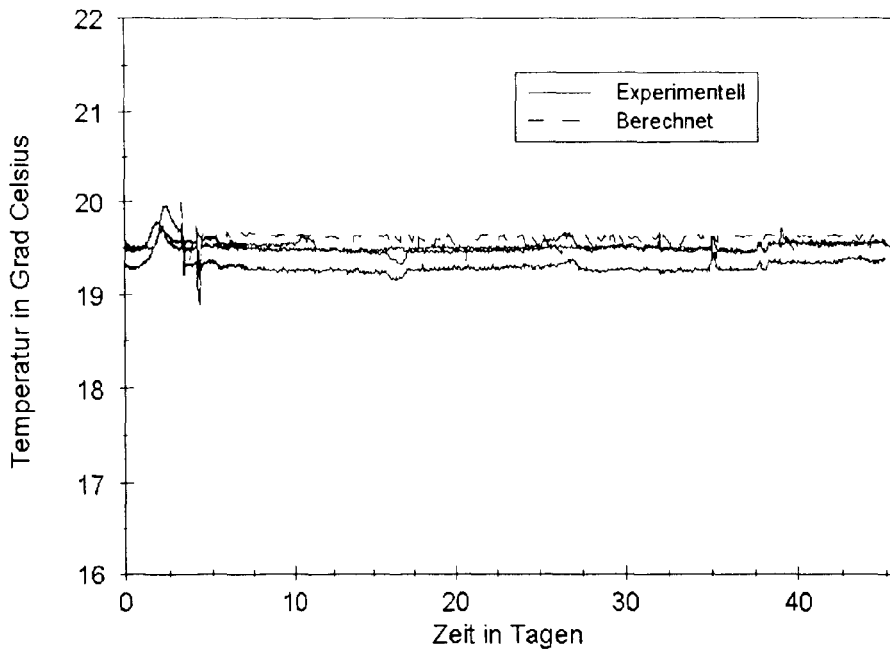


Abb. 35: Temperaturen während der Versuchsserie 2b mit Rühener Grünsandstein, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Innenseite“ gemessen.

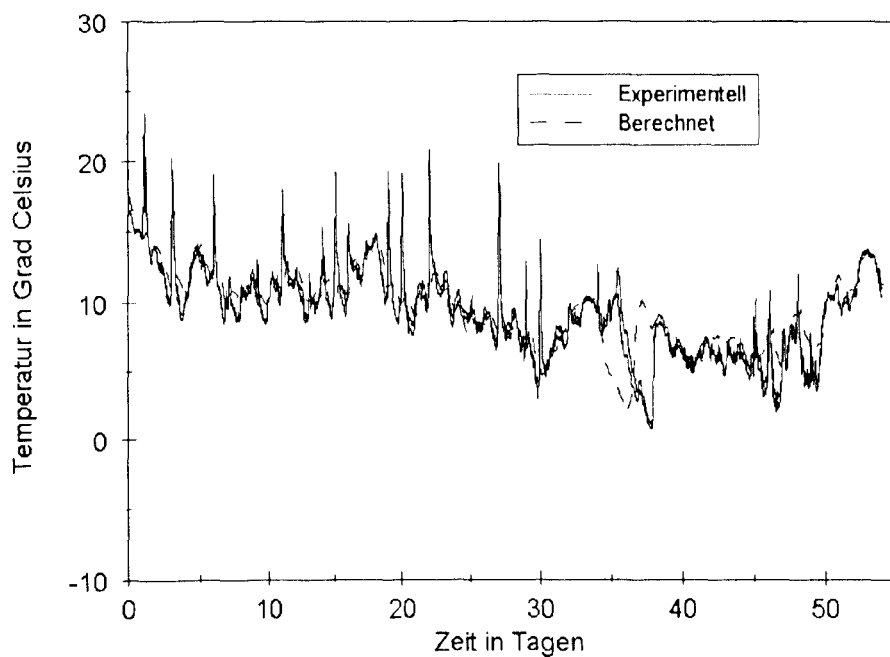


Abb. 36: Temperaturen während der Versuchsserie 3a mit Harzer Dolomit, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Außenseite“ gemessen.

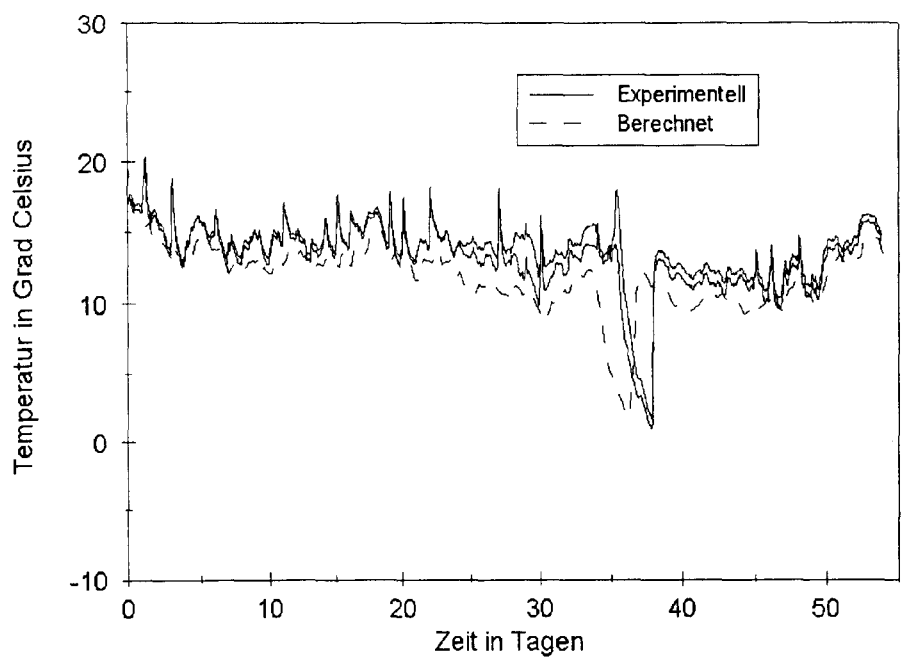


Abb. 37: Temperaturen während der Versuchsserie 3a mit Harzer Dolomit, Mitte der Mörtelfuge.

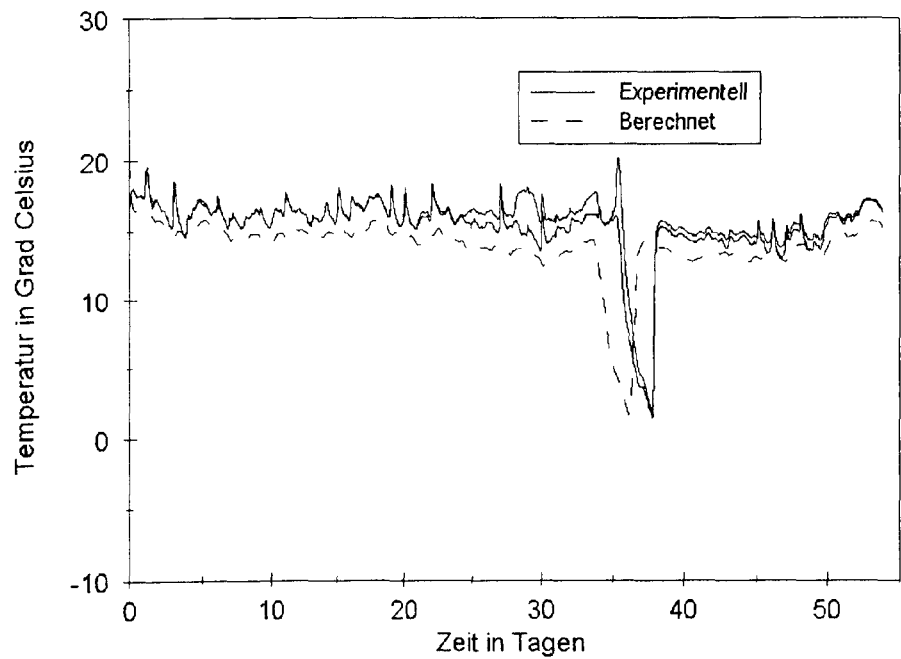


Abb. 38: Temperaturen während der Versuchsserie 3a mit Harzer Dolomit, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Innenseite“ gemessen.

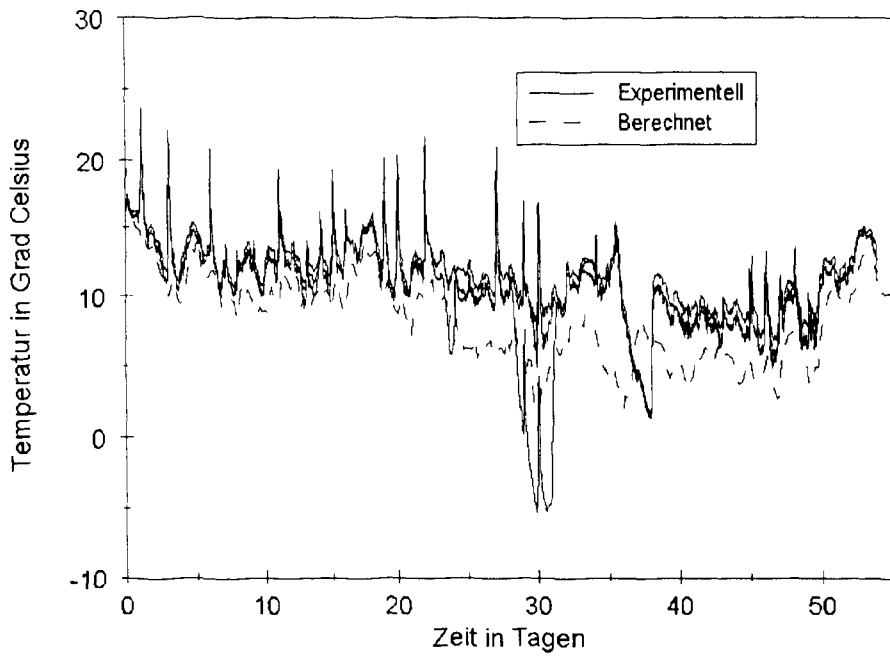


Abb. 39: Temperaturen während der Versuchsserie 3b mit Rühener Grünsandstein, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Außenseite“ gemessen.

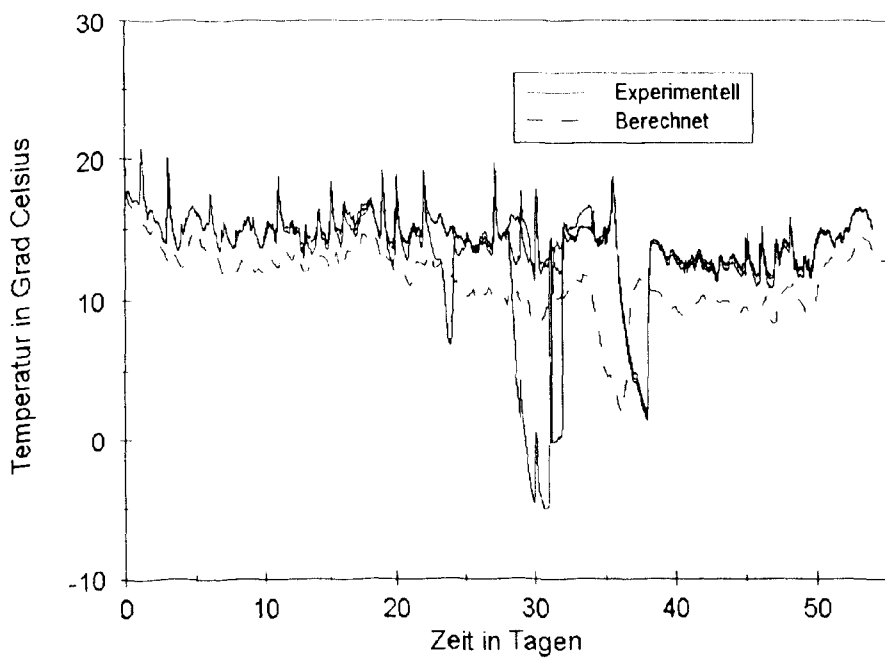


Abb. 40: Temperaturen während der Versuchsserie 3b mit Rühener Grünsandstein, Mitte der Mörtelfuge.

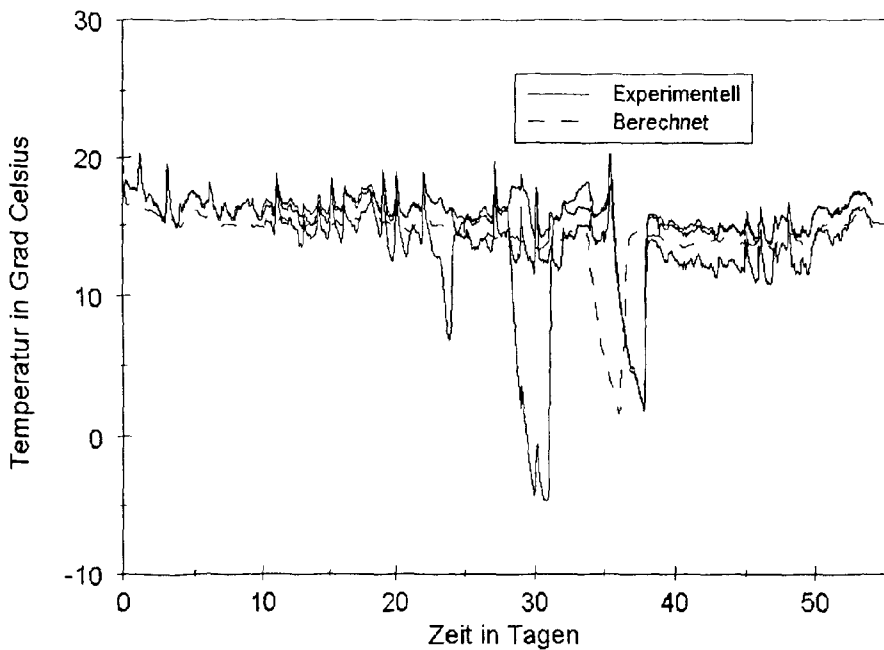


Abb. 41: Temperaturen während der Versuchsserie 3b mit Rüthener Grünsandstein, in 1 cm Tiefe der Mörtelfuge von der „Innenseite“ gemessen.

6.1.2 Feuchteprofile in der Mörtelfuge und im Stein nach dem Ende des Versuchs.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Feuchteprofile in der Mörtelfuge und im Stein nach Beendigung der Versuche und entsprechende berechnete Daten. Die experimentellen Daten wurden über gravimetrische Messungen an Bohrmehl ermittelt. Das Bohrmehl wurde in der Fuge mittig entnommen, im Stein ca. 1,5 bis 2 cm über der Mörtelfuge. Die Feuchtegehalte konnten relativ gut berechnet werden. Lediglich bei Versuch 3b wurde auf der Seite mit Konstantklima eine geringe Kondensation im Sandstein berechnet, die in Realität nicht zu beobachten war. Die Auswirkungen auf den Feuchtegehalt an der „Außenseite“ des Prüfstandes waren gering.

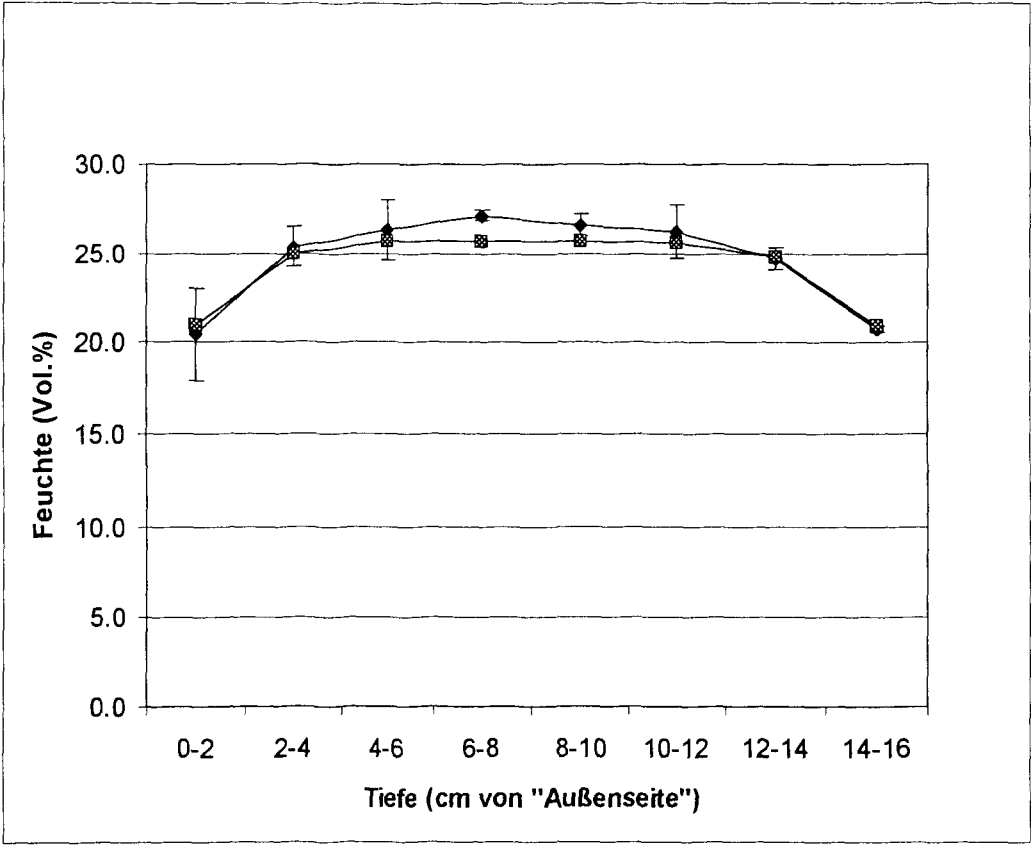


Abb. 42: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Mörtel nach Beendigung der Versuchsserie 1a mit Harzer Dolomit. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

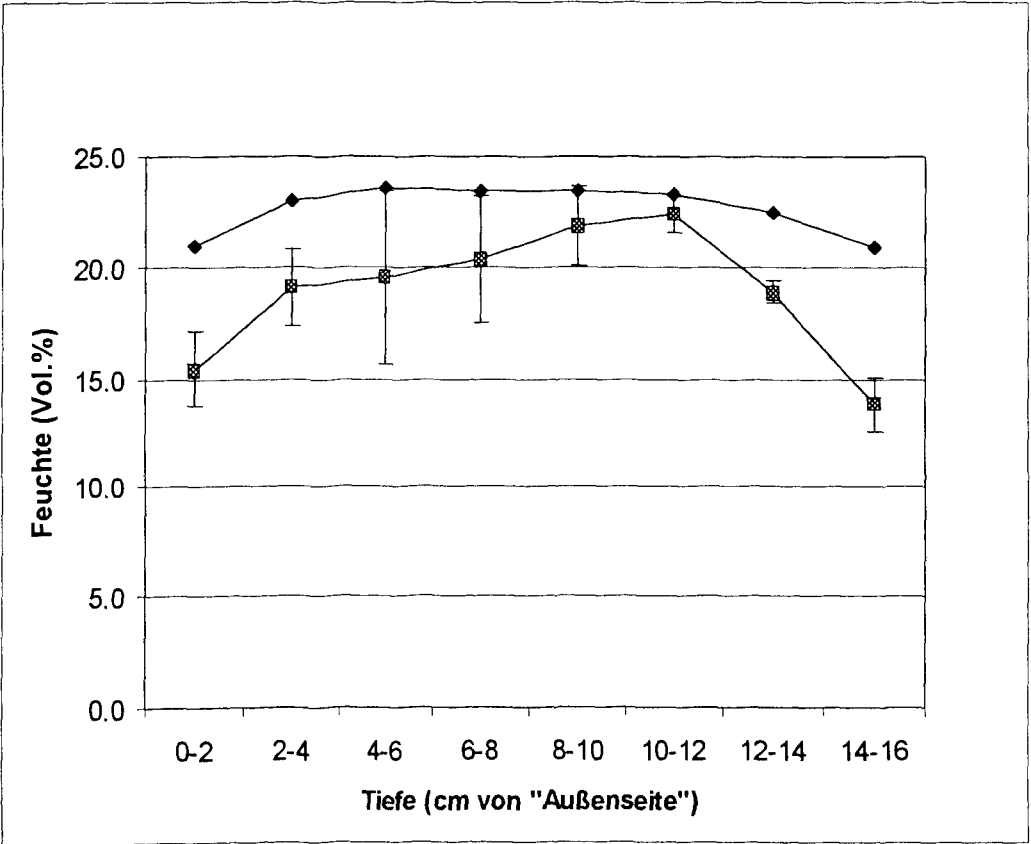


Abb. 43: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Mörtel nach Beendigung der Versuchsserie 1b mit Rühthener Grünsandstein. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

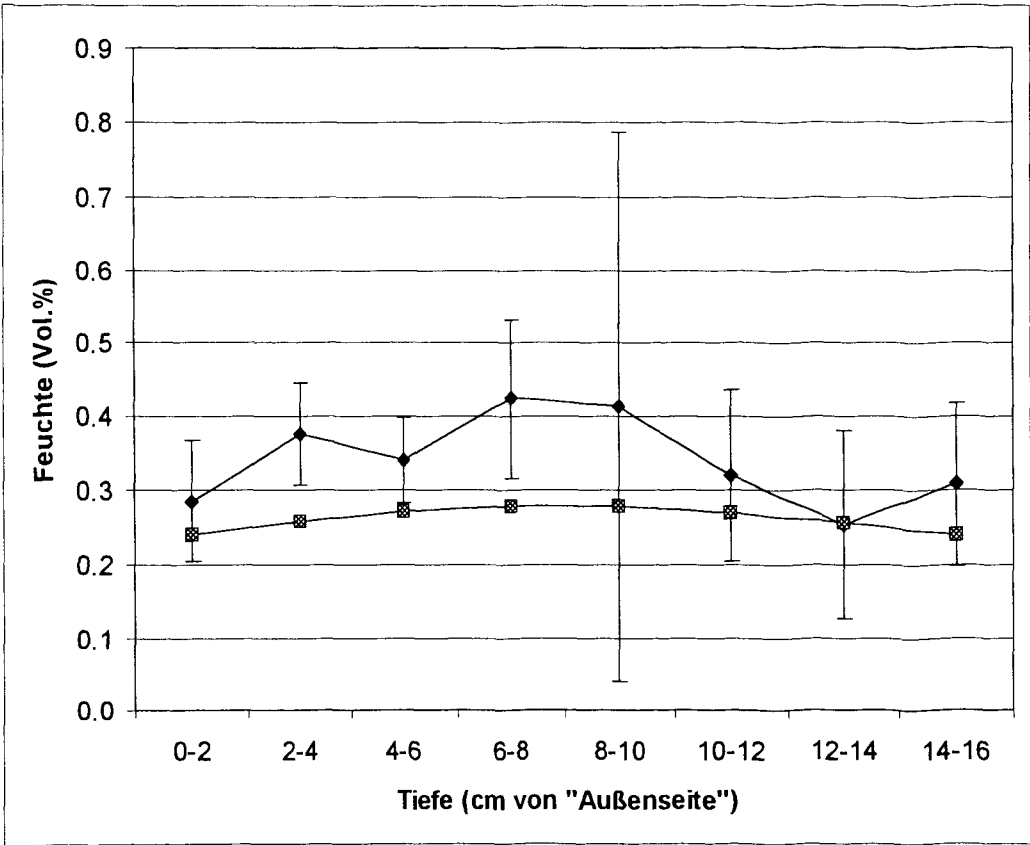


Abb. 44: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Stein nach Beendigung der Versuchsserie 1a mit Harzer Dolomit. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

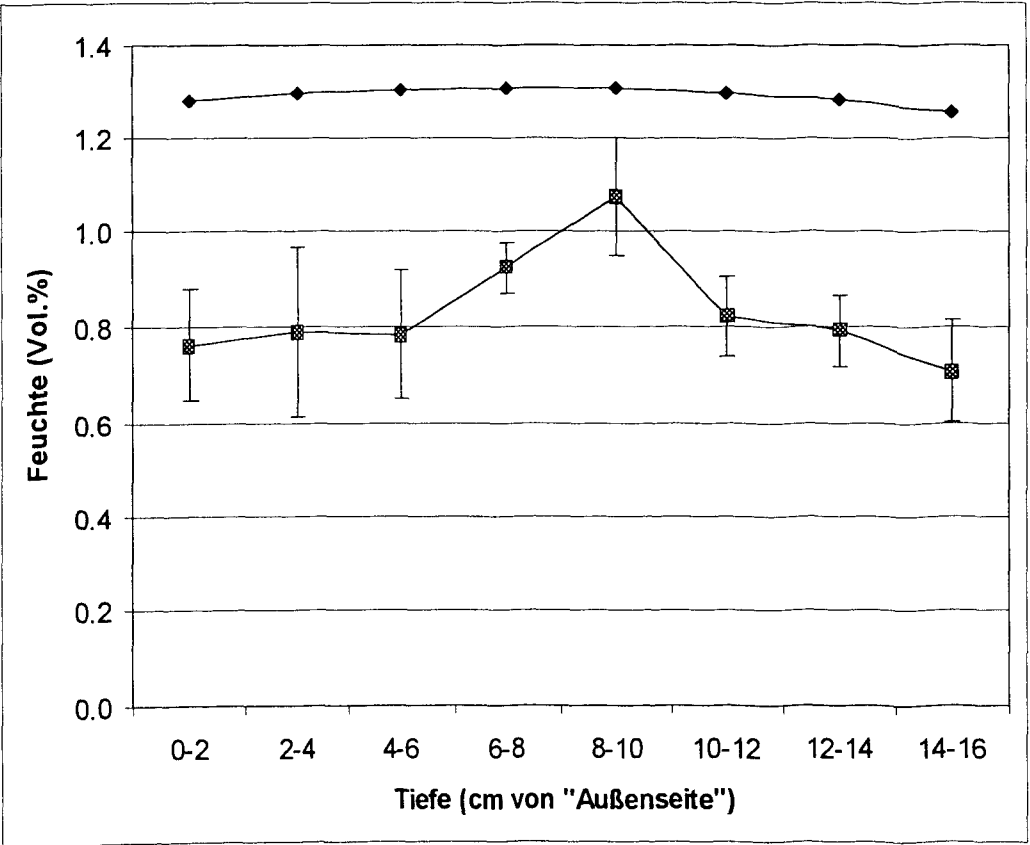


Abb. 45: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Stein nach Beendigung der Versuchsserie 1b mit Rühener Grünsandstein. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

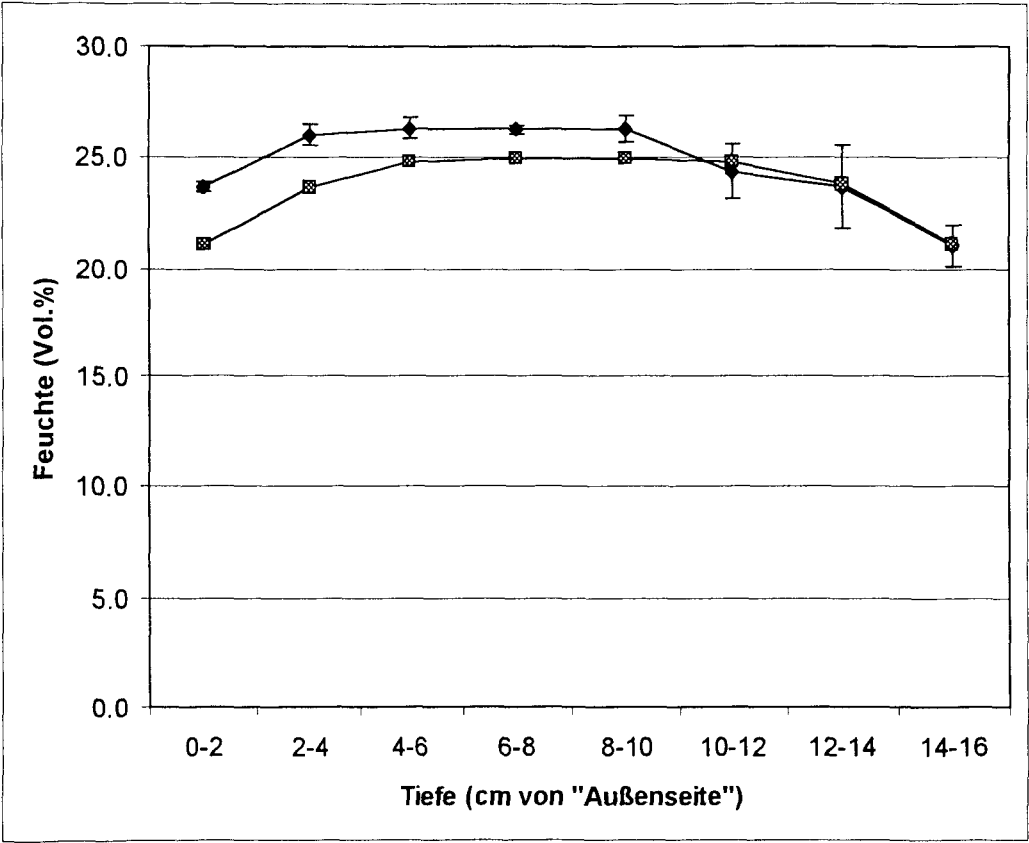


Abb. 46: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Mörtel nach Beendigung der Versuchsserie 2a mit Harzer Dolomit. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

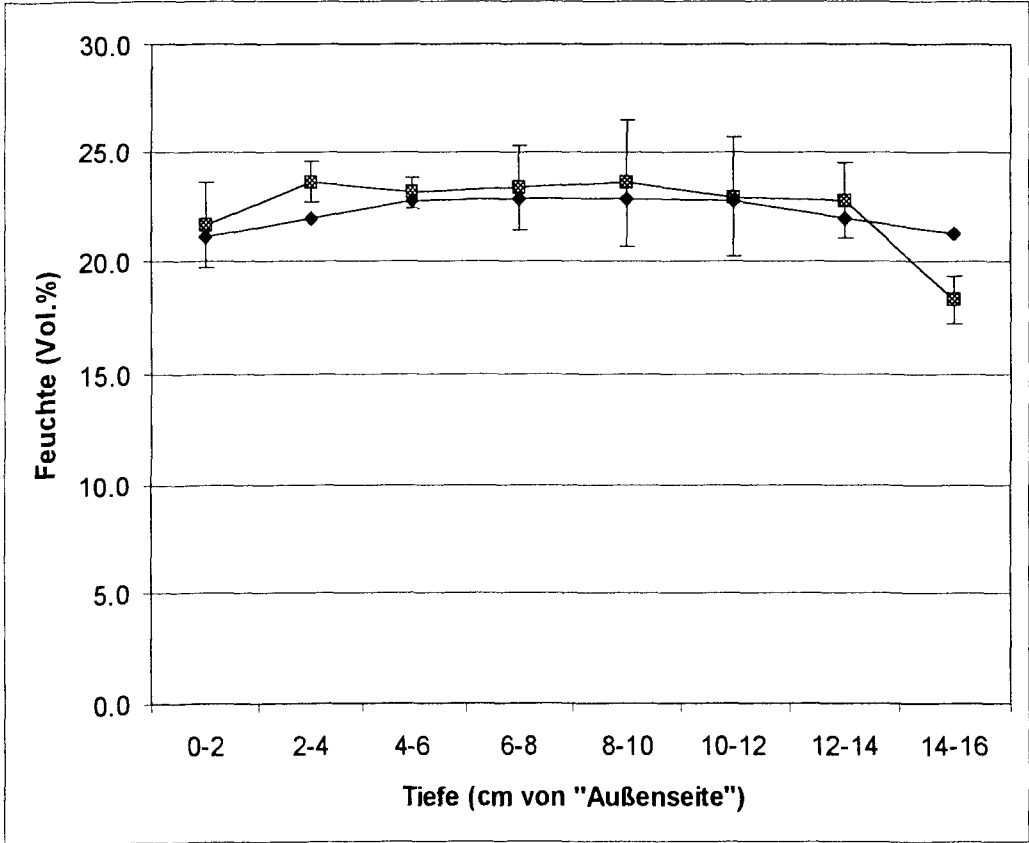


Abb. 47: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Mörtel nach Beendigung der Versuchsserie 2b mit Rühener Grünsandstein. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

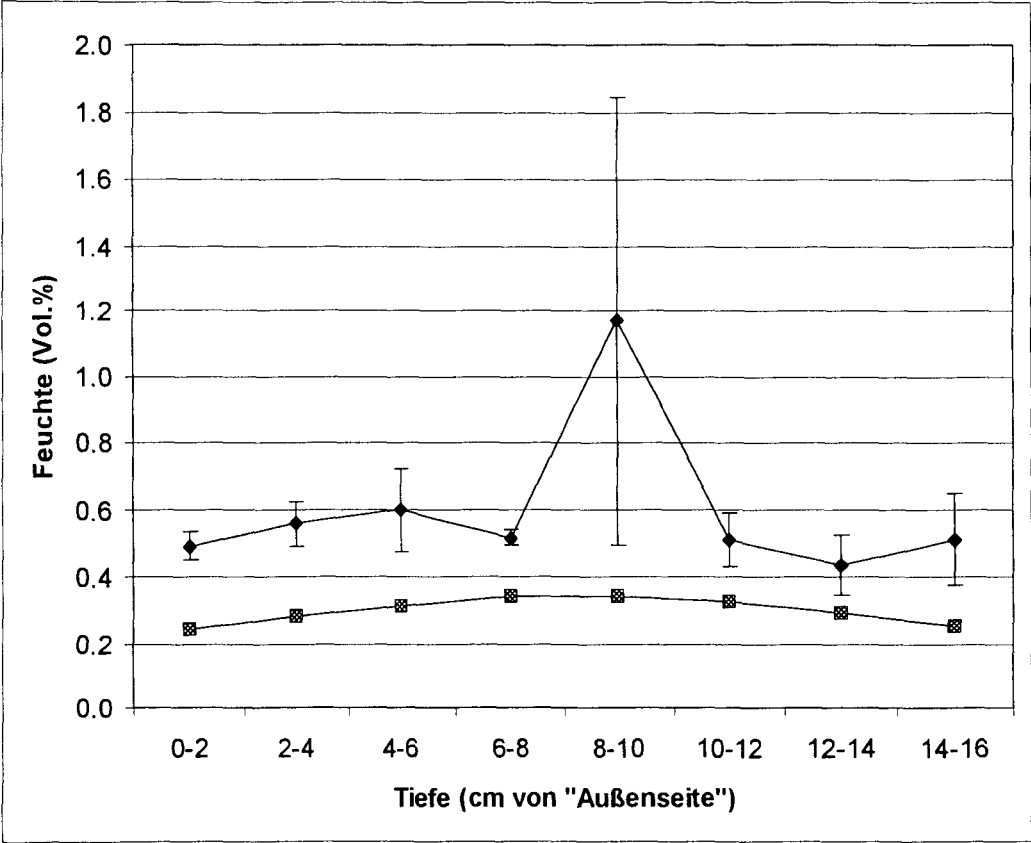


Abb. 48: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Stein nach Beendigung der Versuchsserie 2a mit Harzer Dolomit. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

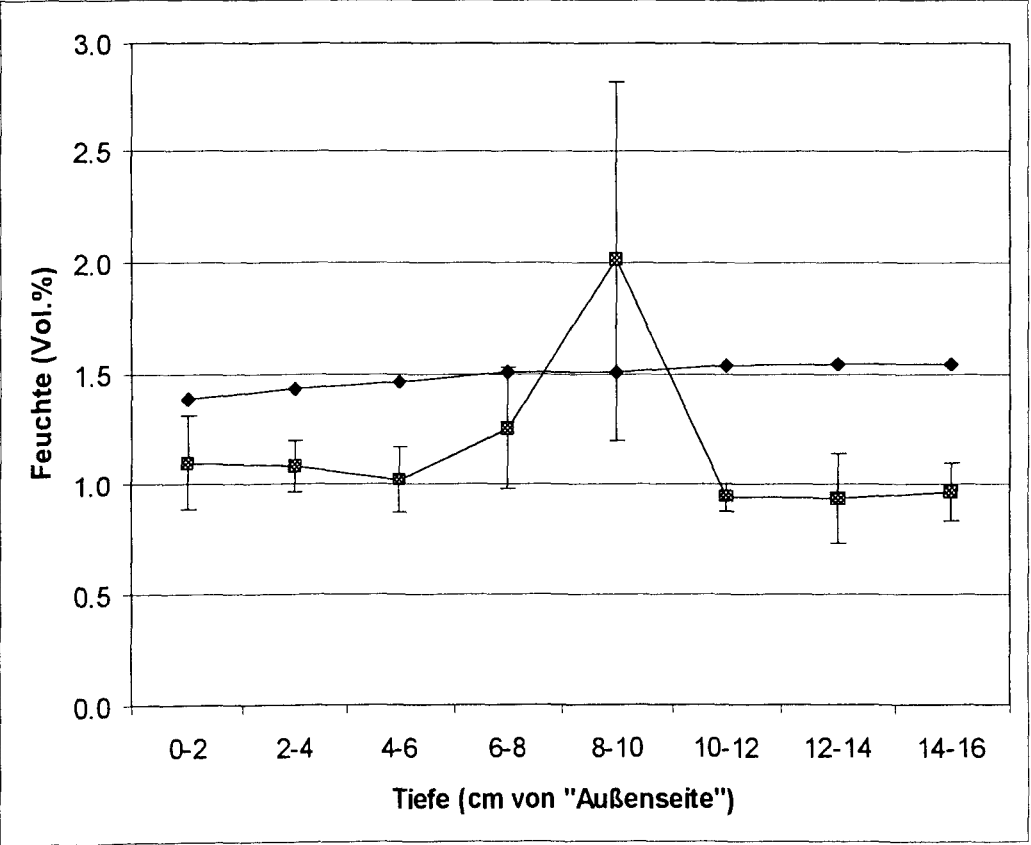


Abb. 49: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Stein nach Beendigung der Versuchsserie 2b mit Rühthener Grünsandstein. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

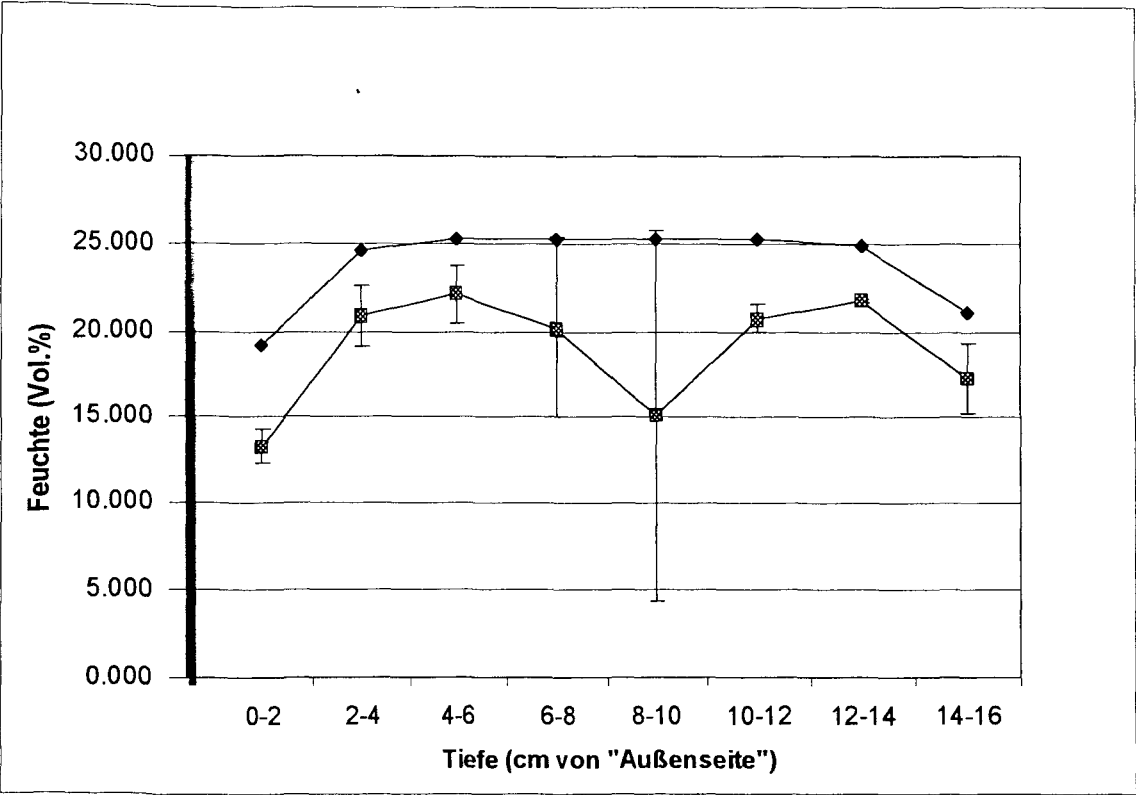


Abb. 50: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Mörtel nach Beendigung der Versuchsserie 3 a mit Harzer Dolomit. Experimentelle Daten mit Fehlerbalken.

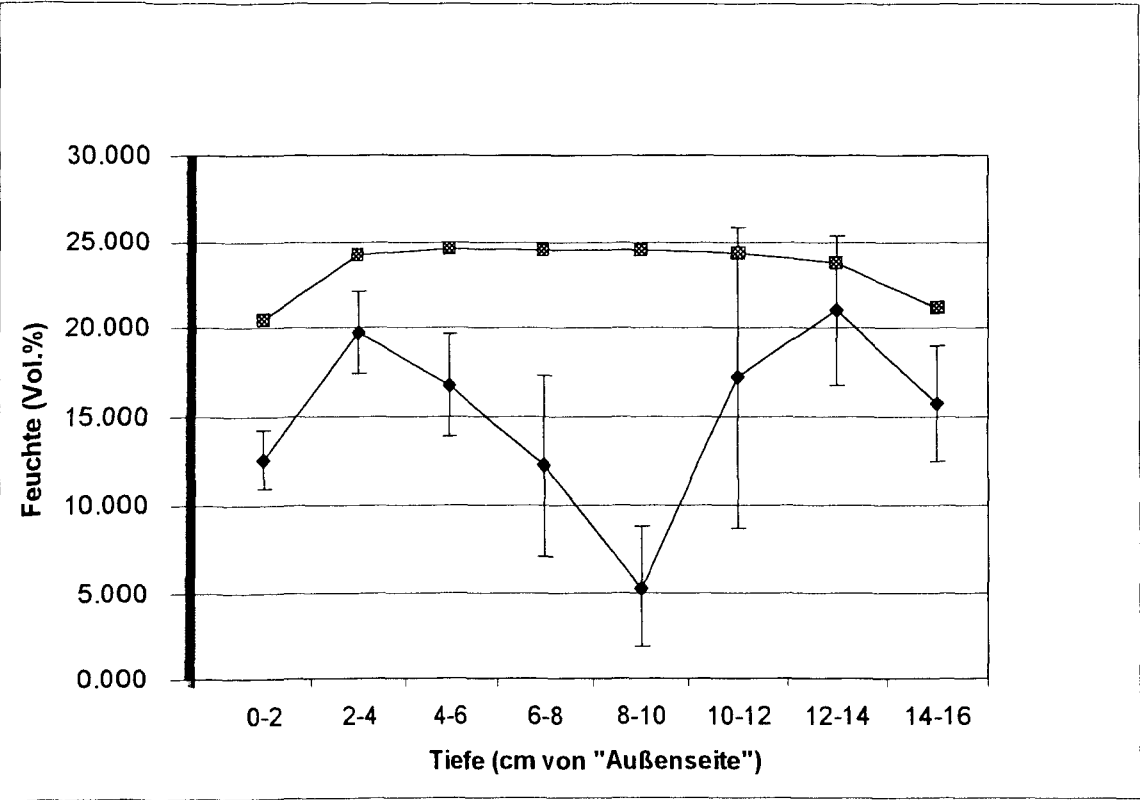


Abb. 51: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Mörtel nach Beendigung der Versuchsserie 3 b mit Rühener Grünsandstein. Experimentelle Daten mit Fehlerbalken.

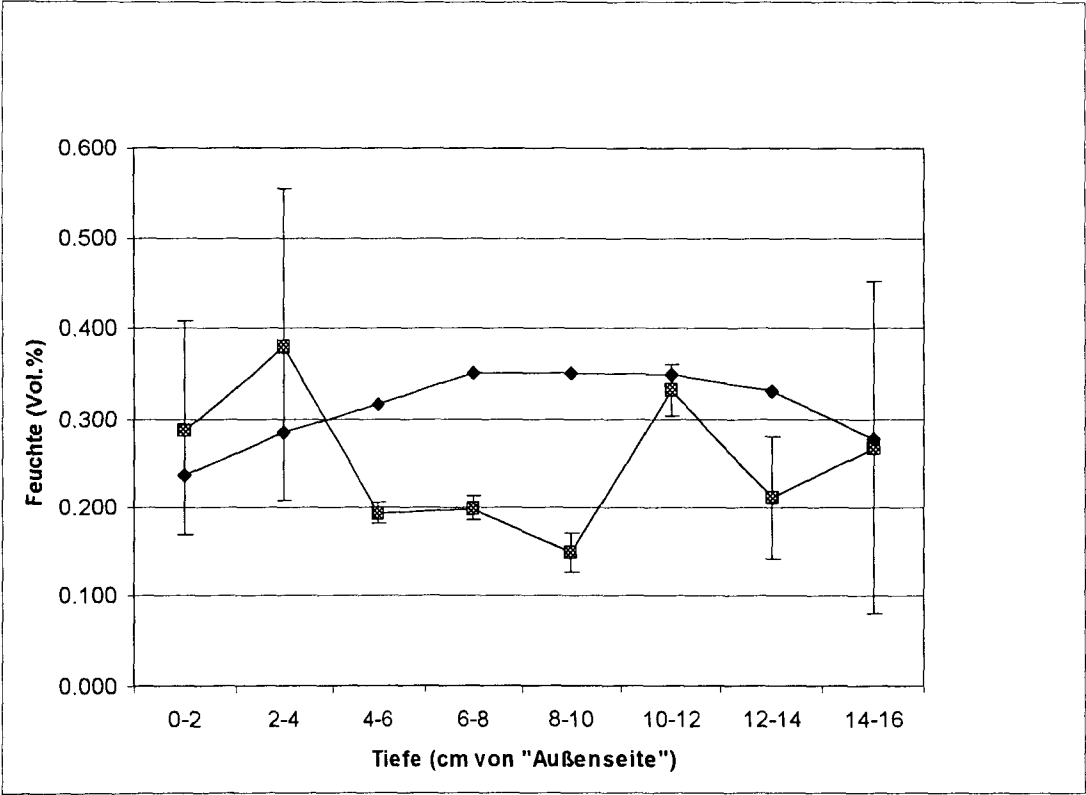


Abb. 52: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Stein nach Beendigung der Versuchsserie 3a mit Harzer Dolomit. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

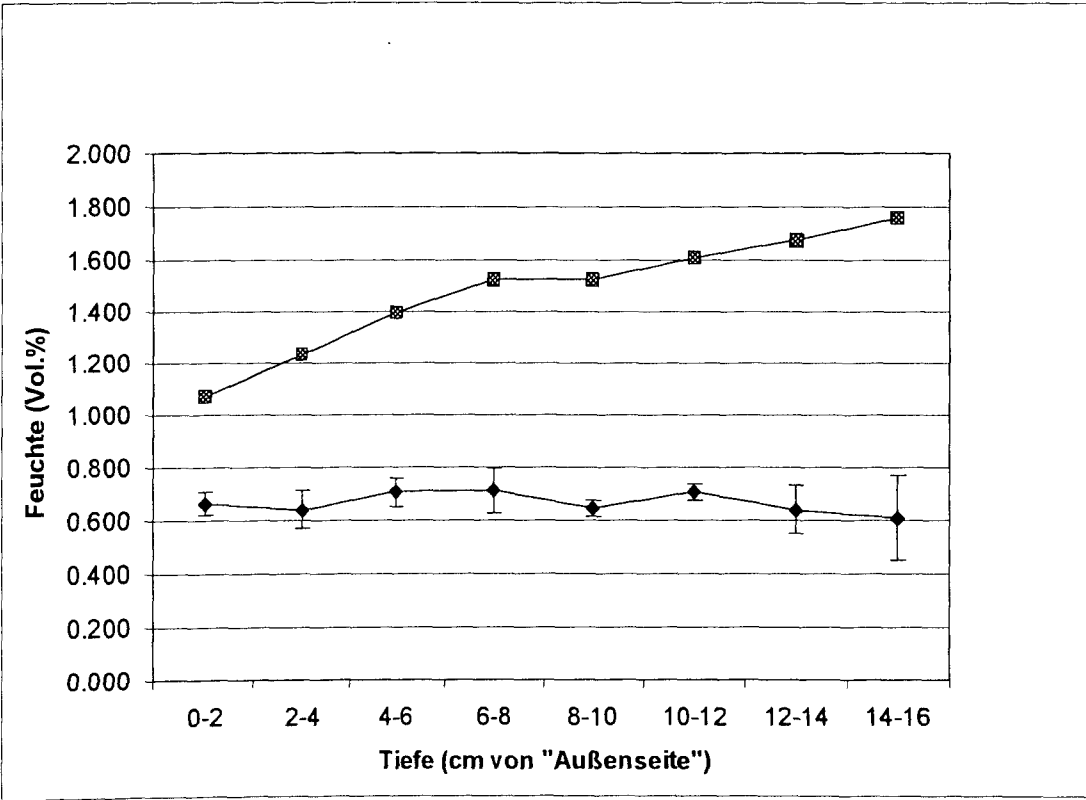


Abb. 53: Experimentelles und berechnetes Feuchteprofil im Stein nach Beendigung der Versuchsserie 3b mit Rühener Grünsandstein. Eperimentelle Daten mit Fehlerbalken.

6.1.3 Verformungen im Stein

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verformungen in y-Richtung (vertikal) im Stein während der Versuche und die entsprechenden berechneten Daten. Die experimentellen Daten wurden mit Wegaufnehmern gemessen, deren Lage aus Abbildung 22 entnommen werden kann. Die Berechnungen wurden soweit möglich mit den in Kap. 5.1 angegebenen Kriechparametern durchgeführt. Dabei mußte generell von dem Wert C1 für ein Erstbelastungsalter von 28 Tagen ausgegangen werden. Anderenfalls traten zu große Kriechraten auf. Der Versuch 3a und 3b wurde aus dem gleichen Grund mit einem nochmals verkleinerten $C1=1 \cdot 10^{-26}$ gerechnet. Trotzdem war in diesem Fall keine Berechnung über die gesamte Versuchslaufzeit möglich. Der Beginn der berechneten Kurven zeigt in den Abbildungen die Umstellung der Klimarandbedingungen von der Vorlagerung auf das Versuchsklima an. Aus den Abbildungen ist zu entnehmen, daß die Steinoberfläche in y-Richtung in allen Versuchen gedehnt wurde, wobei die Abweichungen zwischen den i.d.R. drei Parallelversuchen mit einer Natursteinsorte recht groß waren. Wenige Steine zeigten eine Stauchung. In den Laborversuchen mit Konstantklima erreichten die Probekörper nach ca. 20 Tagen eine weitgehend konstante Verformung. In der Versuchsserie 3 bildet sich der Einfluß des Außenklimas in den Messungen ab. Die Berechnungen bildeten Richtung und Größenordnung der Verformung in allen Fällen ab. Während der Versuchsserien 1a und 3a war die berechnete Verformung etwa um den Faktor 2-3 zu groß. Die fast spontane Einstellung der berechneten Verformung im Gegensatz zu den experimentellen Werten ist darauf zurückzuführen, daß in der Feuchte-transportberechnung von einer sich spontan einstellenden relativen Feuchte in den Prüfraumen ausgegangen werden mußte, während in der Realität dies mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung geschehen ist, die jedoch nicht durch kontinuierliche Messung ermittelt wurde, wie dies bei der Temperatur geschah.

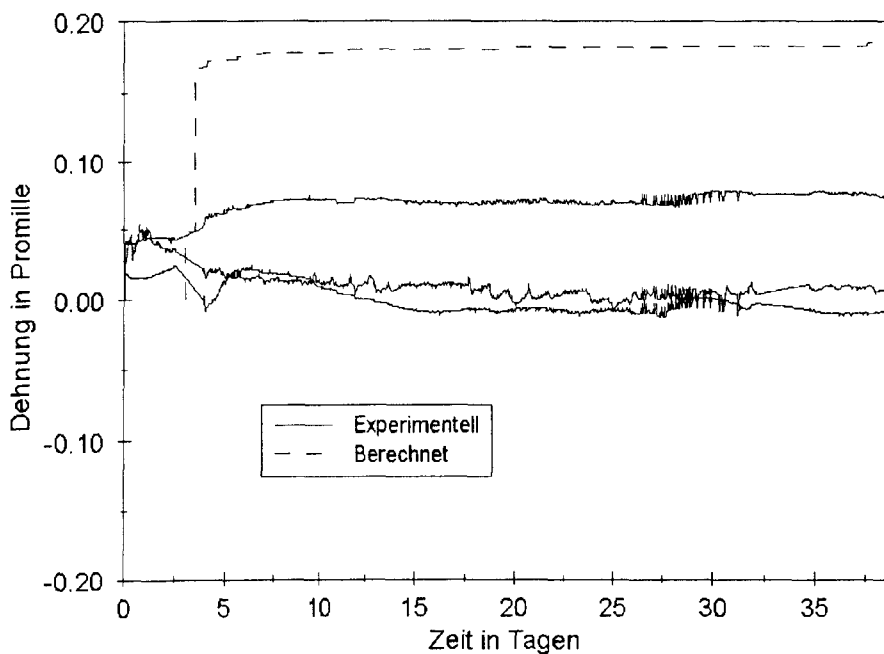


Abb. 54: Verformungen im Stein während der Versuchsserie 1a mit Harzer Dolomit

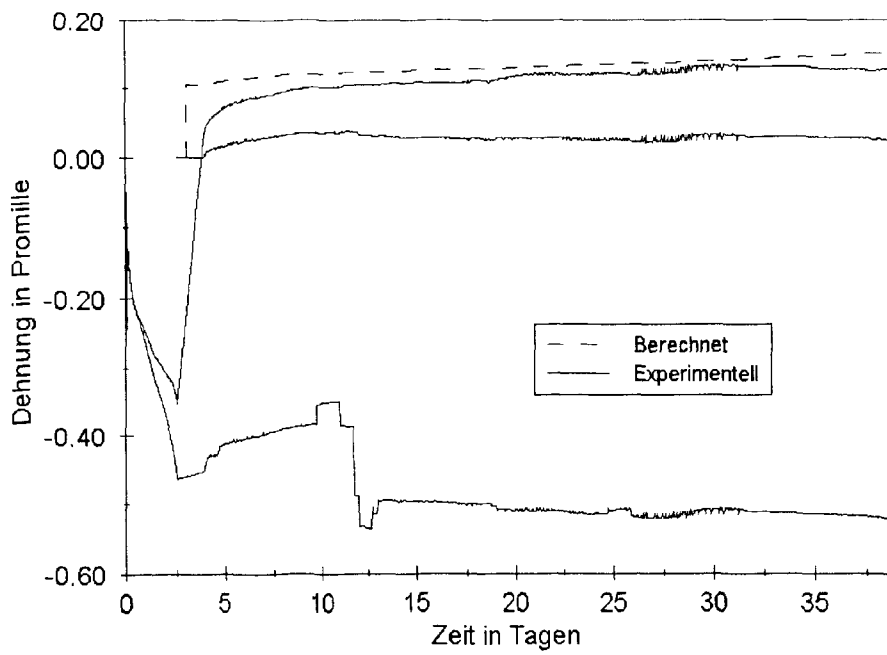


Abb. 55: Verformungen im Stein während der Versuchsserie 1b mit Rühener Grünsandstein

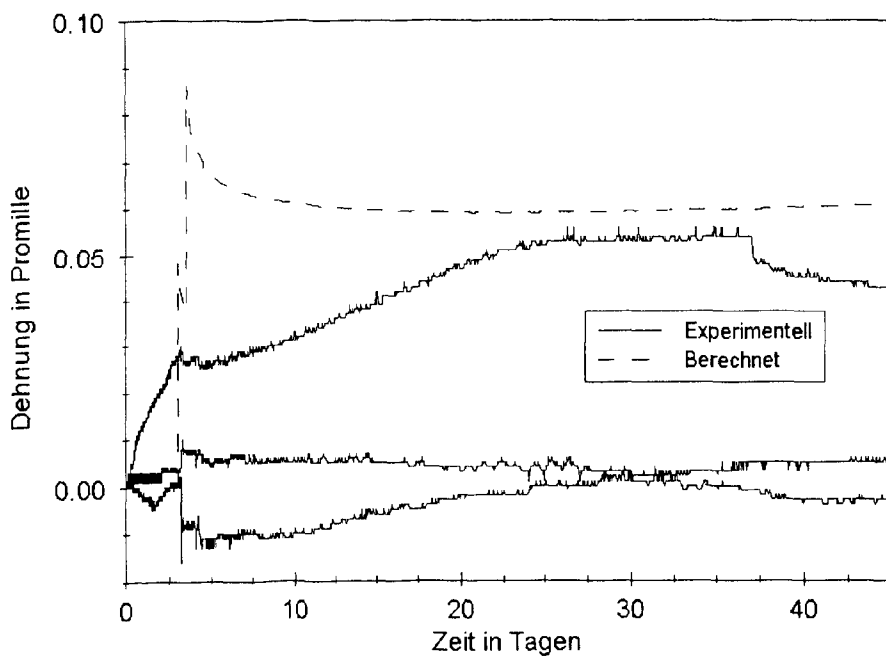


Abb. 56: Verformungen im Stein während der Versuchsserie 2a mit Harzer Dolomit

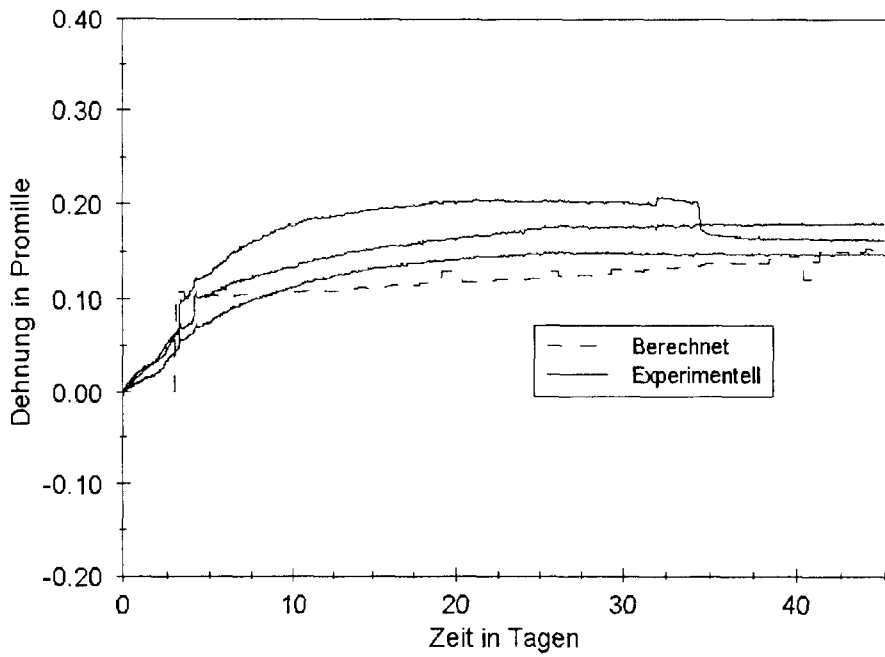


Abb. 57: Verformungen im Stein während der Versuchsserie 2b mit Rütthener Grünsandstein

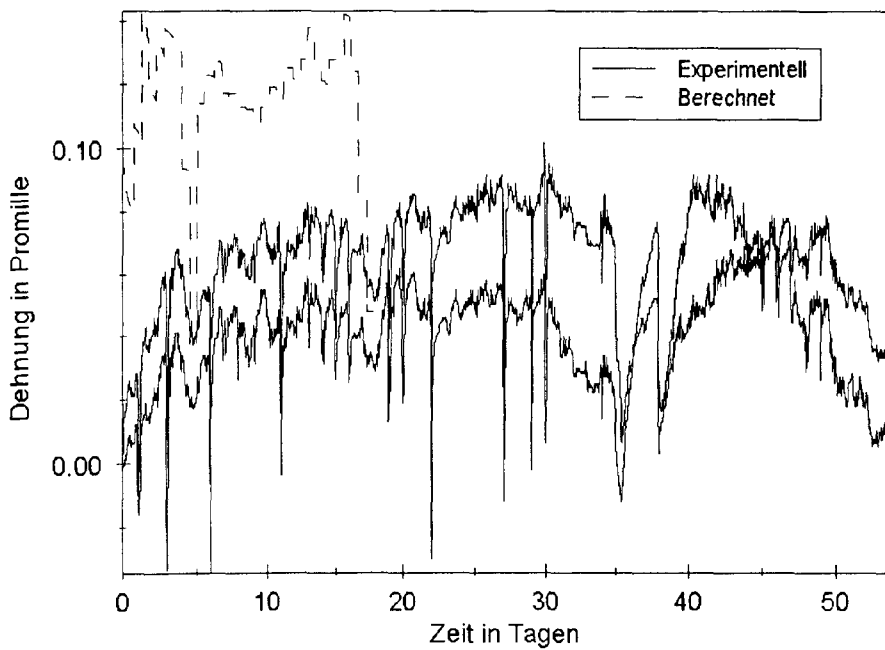


Abb. 58: Verformungen im Stein während der Versuchsserie 3a mit Harzer Dolomit

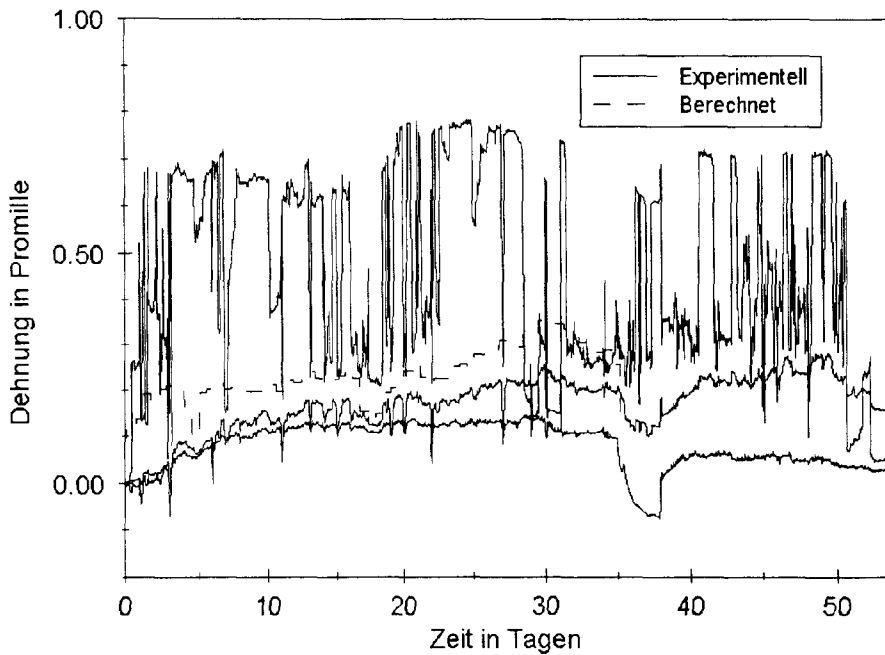


Abb. 59: Verformungen im Stein während der Versuchsserie 3b mit Rühener Grünsandstein

6.1.4 Verformungen über die Fuge hinweg

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verformungen über die Fuge hinweg während der Versuche und entsprechende berechnete Daten. Die experimentellen Daten wurden mit Wegaufnehmern gemessen, deren Lage wiederum aus Abbildung 22 entnommen werden kann. Die Berechnungen wurden soweit möglich mit den in Kap. 5.1 angegebenen Kriechparametern durchgeführt. Dabei mußte generell von dem Wert $C1$ für ein Erstbelastungsalter von 28 Tagen ausgegangen werden, da ansonsten zu große Kriechraten auftraten. Der Versuch 3a und 3b wurde aus dem gleichen Grund mit $C1=1 \cdot 10^{-26}$ gerechnet. Trotzdem war keine Berechnung über die gesamte Versuchslaufzeit möglich. Der Beginn der Kurven der berechneten Daten zeigt in den Abbildungen die Umstellung der Klimarandbedingungen auf das Versuchsklima an. Die Abbildungen zeigen bei fast allen Versuchen eine Verkürzung der Meßstrecke (Schwinden der Fuge). Bei den Laborversuchen wird z.T. nach einiger Zeit eine nahezu konstante Verformung erreicht, z.T. sind die Verformungen aber auch nach 50 Tagen noch nicht abgeklungen. Die Abweichungen zwischen Parallelversuchen mit gleichem Material sind z.T. erheblich. Richtung und Größenordnung der Verformungen bestätigen sich in den Berechnungen. Größere Abweichungen treten wie bei den Verformungen im Stein bei dem Versuch 1a sowie bei den Versuchen mit Außenklima 3a und 3b auf. Im Falle der Versuchsserie 3 kann dies zumindest z.T. auf die Nichtberücksichtigung der Mörtelrelaxation zurückgeführt werden. Die fast spontane Einstellung der berechneten Verformung im Gegensatz zu den experimentellen Werten ist wieder darauf zurückzuführen, daß in der Feuchtransportberechnung von einer sich spontan einstellenden relativen Feuchte in den Prüfraumen ausgegangen werden mußte, während in der Realität dies mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung geschehen ist, die jedoch nicht durch kontinuierliche Messung ermittelt wurde, wie dies bei der Temperatur geschah.

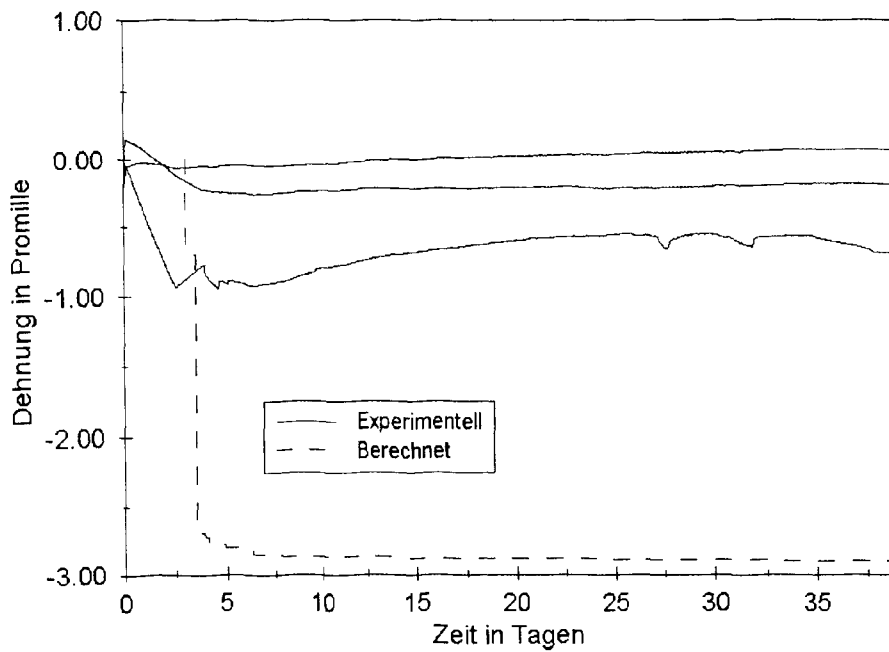


Abb. 60: Verformungen über die Fuge hinweg während der Versuchsserie 1a mit Harzer Dolomit

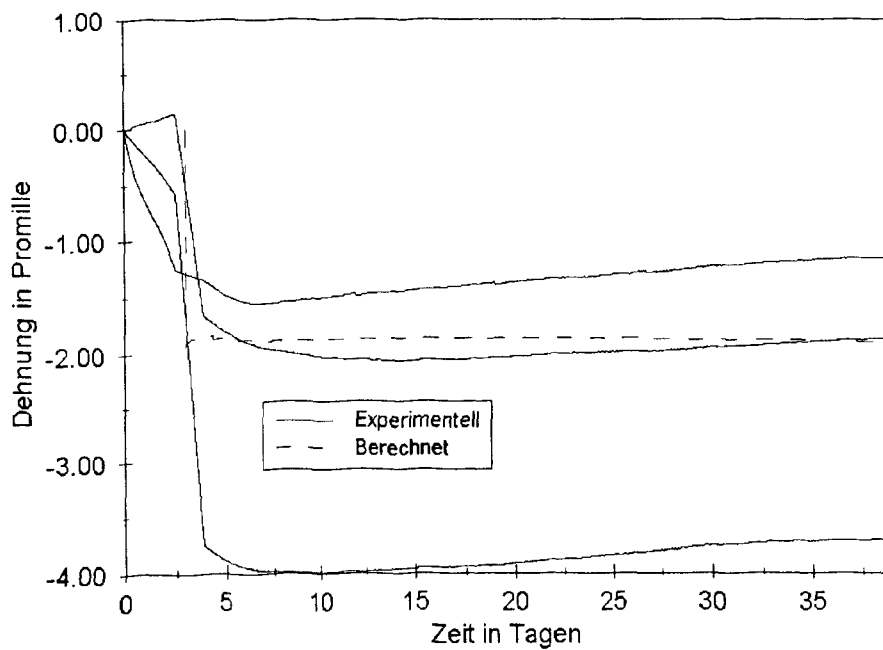


Abb. 61: Verformungen über die Fuge hinweg während der Versuchsserie 1b mit Rühener Grünsandstein

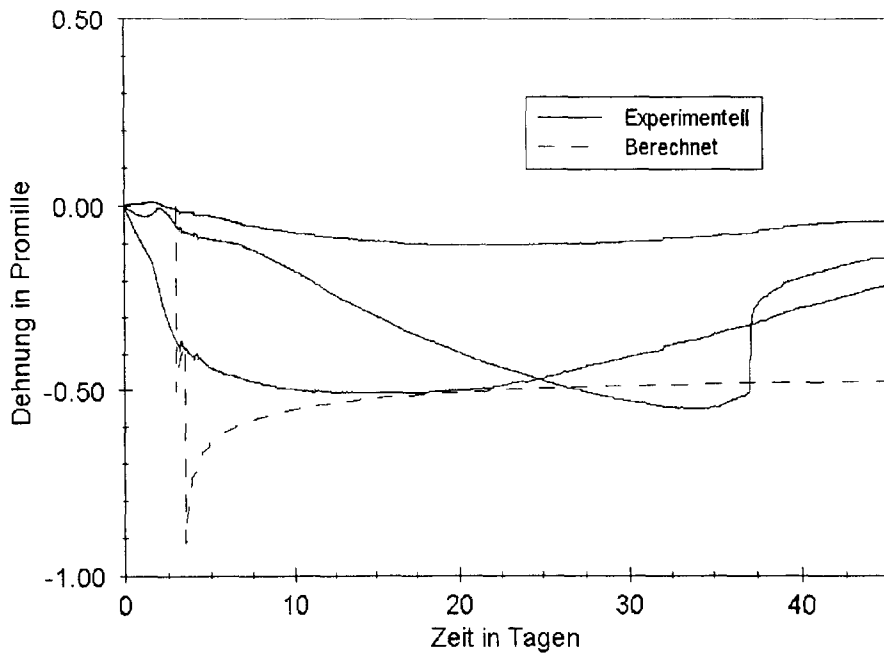


Abb. 62: Verformungen über die Fuge hinweg während der Versuchsserie 2a mit Harzer Dolomit

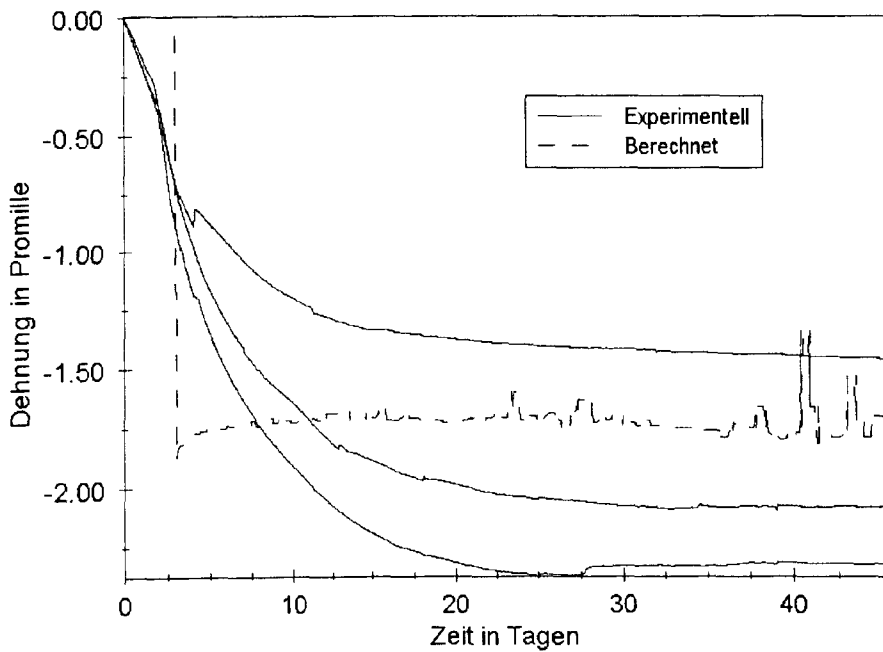


Abb. 63: Verformungen über die Fuge hinweg während der Versuchsserie 2b mit Rühener Grünsandstein

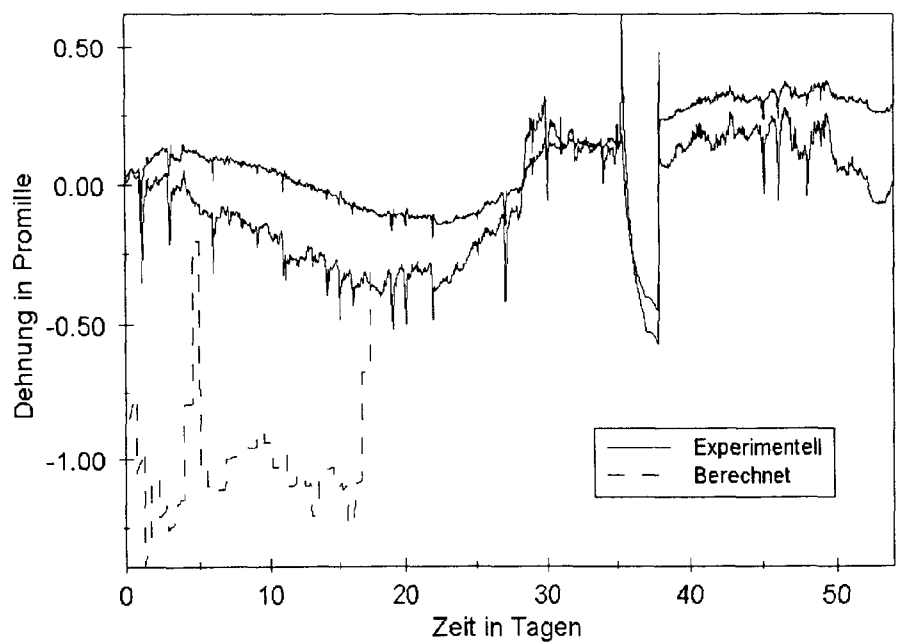


Abb. 64: Verformungen über die Fuge hinweg während der Versuchsserie 3a mit Harzer Dolomit

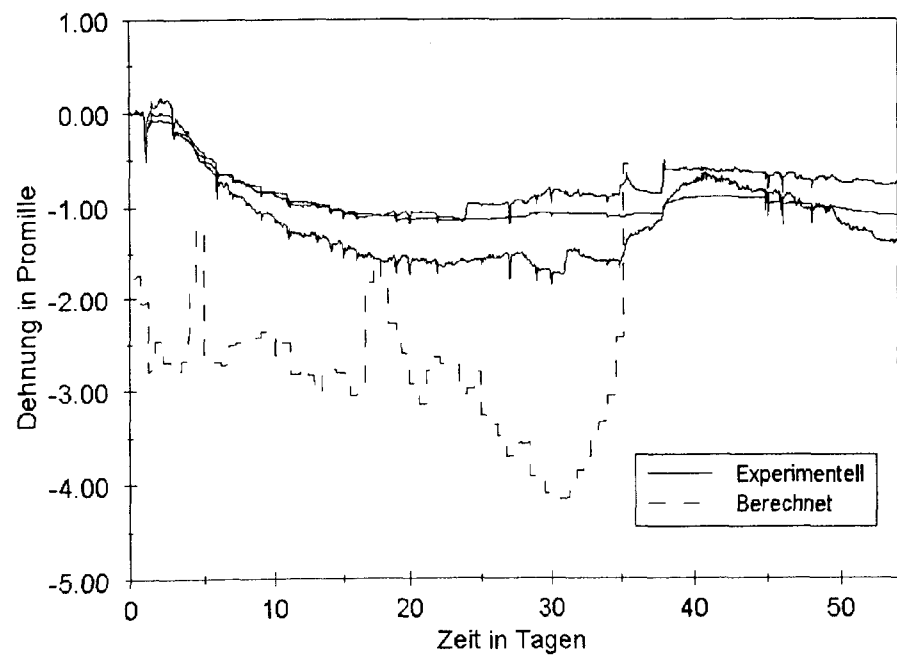


Abb. 65: Verformungen über die Fuge hinweg während der Versuchsserie 3b mit Rühener Grün-sandstein

6.1.5 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle der Versuchsserien 1a und 1b

Experimenteller Befund

Ca. zwei Wochen nach Stopfen der Fuge (ca. 1 Woche nach Umstellung auf Versuchsklima) konnte im Falle des Harzer Dolomits auf der Außenseite ein nahezu vollständiger Flankenabriß beobachtet werden, dazu trat jeweils ein nahezu mittiger Anriß oder Durchriß der Fuge normal zur Flanke. Eine wesentliche Verstärkung der Rißbildung auf der Außenseite konnte dann mit zunehmender Versuchsdauer nicht mehr beobachtet werden. Auf der Innenseite der Dolomitprobekörper traten zum gleichen Zeitpunkt jeweils Flankenrisse auf sowie keine bis vollständige Durchrisse der Fugen normal zur Flanke (Lage nahezu mittig in der Fuge). Im weiteren Verlauf des Versuchs kam es teilweise zu keinen weiteren Rißbildungen, teilweise zu einem Durchriß der Fuge.

Im Falle des Grünsandsteins konnte in der zweiten Woche nach Stopfen der Fuge (ca. 1 Woche nach Umstellung auf Versuchsklima) außen Flanken- oder -abrisse sowie jeweils ein vollständiger Durchriß der Fuge normal zur Flanke beobachtet werden (Lage nahezu mittig in der Fuge). Im weiteren Verlauf trat keine verstärkte Rißbildung auf. Auf der Innenseite konnten zum gleichen Zeitpunkt nur Flankenrisse beobachtet werden, die 2 Wochen später z.T. stärker geworden waren. Komplette Flankenabrisse traten nicht auf. Nur bei einem von drei Probekörper konnte zu diesem Zeitpunkt ein nicht durchlaufender Riß in der Fuge normal zur Flanke beobachtet werden (Lage nahezu mittig in der Fuge).

Vergleich mit dem Forschungsmodell:

Das Forschungsmodell prognostizierte für beide Versuchsserien 1a und 1b die Bildung von Flankenrissen durch Überschreitung der Haftzugfestigkeit. Diese kann in beiden Fällen mit einem Maximalwert von $1,4 \text{ N/mm}^2$ angesetzt werden (s. Tab. 3), allerdings bei ordnungsgemäßer Vermörtelung mit Vornässen, was bei der Serie 1 nicht der Fall war. Die Ergebnisse entsprechen damit dem experimentellen Befund. Die Simulationsberechnungen ergaben im oberflächennahen Fugenbereich der „Außenseite“ Spannungen in y-Richtung ansteigend von 12 bis 46 N/mm^2 über den simulierten Zeitabschnitt bei Versuchsserie 1a (Harzer Dolomit) und -2 bis $4,7 \text{ N/mm}^2$ bei Versuchsserie 1b (Rüthener Grünsandstein). Die geringere Rißneigung des Mörtels im Verbund mit Rüthener Grünsandstein wird deutlich. Im Experiment ergab die Versuchsserie mit Harzer Dolomit stets eine starke und schnelle Flankenrißbildung, diese war beim Rüthener Grünsandstein schwächer und wurde über einen längeren Zeitraum ausgeprägt.

Vergleich mit dem Ingenieurmodell (s. Tabellenkalkulationen im Anhang)

Im Falle der Versuchsserien 1a und 1b prognostizierte das Ingenieurmodell stets die Bildung von Flankenrissen, wobei auch hier deutliche Unterschiede zwischen den Versuchen mit Rüthener Grünsandstein und Harzer Dolomit berechnet wurden. Im Falle des Harzer Dolomits waren die berechneten Spannungen (mind. $7,3 \text{ N/mm}^2$) stets wesentlich größer als die Haftzugfestigkeit des Verbundsystems, im Falle des Rüthener Grünsandsteins lagen die berechneten Spannungen je nach Annahme günstiger oder ungünstiger Eingangsdaten bei mindestens $1,2$ und maximal $6,3 \text{ N/mm}^2$. Der Minimalwert reicht in den Bereich der Haftzugfestigkeit, allerdings nur bei optimalen Bedingungen, die hier nicht vorlagen (kein Vornässen der Steine).

6.1.6 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle der Versuchsserien 2a und 2b

Experimenteller Befund

Die Rißbildung auf der Außenseite der Zwei-Stein-Körper aus Harzer Dolomit reichte von einer sehr geringen Rißbildung entlang einer Fugenflanke 5 Wochen nach dem Stopfen (ca. 4 Wochen nach Einstellung des Versuchsklimas) bis hin zu einem halb durchgehenden Flankenabriß eine Woche nach dem Stopfen, der dann nach einer weiteren Woche vollständig durchgerissen war. Risse in der Mörtelfuge normal zur Flanke konnten hier nicht beobachtet werden. Auf der Innenseite konnten im Alter von einer bis 3 Wochen nach dem Stopfen Flankenrisse beobachtet werden. Ein vollständiger Durchriß war nicht zu beobachten. Ein Riß in der Mörtelfuge normal zur Flanke konnte nur bei einem von drei Körpern beobachtet werden. Dieser bildete sich im Alter von 3 Wochen nach dem Stopfen (Lage nahezu mittig in der Fuge). Die Fuge wurde auch im weiteren Verlauf nicht vollständig durchgerissen.

4 bis 5 Wochen nach dem Stopfen (ca. 3 bis 4 Wochen nach Einstellung des Versuchsklimas) konnte auf der Außenseite der Zwei-Stein-Körper aus Rühener Grünsandstein geringe Flankenrisse beobachtet werden. Risse normal zur Flanke traten nicht auf. Auf der Innenseite traten Flankenrisse zuerst 2 Wochen nach dem Stopfen auf und verstärkten sich im weiteren Verlauf des Versuchs. Bei einem Probekörper trat ein geringer Flankenabriß erst 5 Wochen nach dem Stopfen auf. Flankenabrisse waren in keinem Fall zu beobachten. Dies gilt auch für Risse in der Fuge normal zur Flanke.

Vergleich mit dem Forschungsmodell:

Die Simulationsberechnungen ergaben im oberflächennahen Fugenbereich der „Außenseite“ Spannungen in y-Richtung zwischen 13 und 31 N/mm² über den simulierten Zeitabschnitt bei Versuchsserie 2a (Harzer Dolomit) und -2 bis 4,1 N/mm² bei Versuchsserie 2b (Rühener Grünsandstein) über den simulierten Zeitabschnitt. Die Maximalspannungen lagen in beiden Fällen über der Haftzugfestigkeit die wieder mit einem Maximalwert von 1,4 N/mm² angesetzt werden kann. Dies entspricht dem experimentellen Befund. Wie bei Versuchsserie 1 wird die geringere Rißneigung des Mörtels im Verbund mit Rühener Grünsandstein deutlich.

Vergleich mit dem Ingenieurmodell (s. Tabellenkalkulationen im Anhang)

Auch die Berechnungen mit dem Ingenieurmodell ergaben für beide Systeme eine Flankenrißbildung durch Überschreitung der Haftzugfestigkeit. Wiederum ragten die berechneten Spannungen beim Rühener Grünsandstein (mind. 1,2, max. 5,2 N/mm², je nach günstigem oder ungünstigem Eingangsdatensatz) in den Bereich der Haftzugfestigkeit, die bei der Versuchsserie 2 mit Vornäsen der Steine höher angesetzt werden kann als bei Versuchsserie 1. Die berechneten Spannungen beim Harzer Dolomit waren deutlich größer (mind. 4,2 N/mm²) als die Haftzugfestigkeit. Dies entspricht den experimentellen Ergebnissen, nach denen die Rißbildung im Falle des Harzer Dolomits stärker ausgeprägt war als beim Rühener Grünsandstein.

6.1.7 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle der Versuchsserien 3a und 3b

Experimenteller Befund

Auf der natürlich bewitterten Außenseite der Probekörper aus Harzer Dolomit konnten in der 2. Woche nach dem Stopfen (ca. 1,5 Wochen nach Umstellung auf Versuchsklima) Flankenrisse beobachtet werden, die sich in der 8. Woche verstärkten und z.T. zu einem Flankenabriß auswei-

teten. Risse in der Fuge normal zur Flanke traten nicht auf. Auf der Innenseite wurden z.T. keine Risse beobachtet, zum Teil trat in der 2. Woche nach dem Stopfen ein Flankenabriß auf, der sich in der 8. Woche verstärkte, wobei sich in einem Fall auch ein mittiger Anriß in der Fuge normal zur Flanke ausbildete.

Auf der natürlich bewitterten Außenseite der Probekörper aus Rüthener Grünsandstein konnten in der 2. bis 4. Woche nach dem Stopfen (ca. 1,5 bis 3,5 Wochen nach Umstellung auf Versuchsklima) Flanken- und abrisse beobachtet werden. Anrisse verstärkten sich z.T. in der 8. Woche und weiteten sich zu einem Flankenabriß aus. Risse in der Fuge normal zur Flanke traten nicht auf. Auf der Innenseite wurden z.T. keine Risse beobachtet, zum Teil trat in der 1. Woche nach dem Stopfen ein Flankenabriß auf. Risse in der Fuge normal zur Flanke bildeten sich nicht.

Vergleich mit dem Forschungsmodell:

Die Simulationsberechnungen ergaben im oberflächennahen Fugenbereich der „Außenseite“ Spannungen in y-Richtung zwischen $9,2$ und 47 N/mm^2 über den simulierten Zeitabschnitt bei Versuchsserie 3a (Harzer Dolomit) und -2 bis 13 N/mm^2 bei Versuchsserie 3b (Rüthener Grünsandstein) über den simulierten Zeitabschnitt. Die Maximalspannungen lagen in beiden Fällen über der Haftzugfestigkeit die wieder bei maximal $1,4 \text{ N/mm}^2$ angesetzt werden kann. Dies entspricht dem experimentellen Befund. Es wurde nur die „Außenseite“ betrachtet.

Vergleich mit dem Ingenieurmodell (s. Tabellenkalkulationen im Anhang)

Zunächst wird die frei bewitterten „Außenseite“ betrachtet. Dort traten im Experiment stets Risse auf. Dem entspricht das Ergebnis der Spannungsberechnung mit dem Ingenieurmodell (Harzer Dolomit, Serie 3a: mind. $3,8 \text{ N/mm}^2$, Rüthener Grünsandstein, Serie 3b: mind. $1,3$, max. $4,4 \text{ N/mm}^2$, je nach günstigem oder ungünstigen Eingangsdatensatz). Dagegen traten auf der Innenseite nur bei einem Teil der Versuchskörper Risse auf, sowohl im Falle des Harzer Dolomits als auch beim Rüthener Grünsandstein. Die Berechnung ergab in beiden Fällen eine Spannung größer als die Haftzugfestigkeit (Harzer Dolomit, Serie 3a: mind. $8,2 \text{ N/mm}^2$, Rüthener Grünsandstein, Serie 3b: mind. $2,2 \text{ N/mm}^2$). Hier liegt also ein Widerspruch zum Experiment vor, wobei das Ingenieurmodell die Gefahr der Rißbildung überschätzt.

6.2 Versuche an einem Mauerwerksausschnitt und Vergleich mit berechneten Ergebnissen

Aus Rüthener Grünsandstein wurde ein dreischaliger Mauerwerksausschnitt aufgebaut. Bei der Probewand handelte sich um ein unregelmäßiges Schichtenmauerwerk mit Hausteinen. Als Mauermörtel wurde ein Kalkzementmörtel der Rezeptur 1 RT CEM III/A, 3 RT Weißkalkhydrat, 16 RT Sand 0-2 mm, mit einem Ausbreitmaß zwischen 13,2 und 14,9 cm verwendet. Der Wandausschnitt wurde ca. 3 Monate auf einer Seite unverfugt belassen. Diese Seite wurde dann mit dem modifizierten HGJ-Mörtel verfugt und atmosphärisch bewittert. Die an 5 Prüfstellen gemessenen Temperaturveränderungen im Mörtel in ca. 2,5, 5, 10, 35 und 60 cm Tiefe, Materialfeuchten am Ende des Versuchs, Verformungen in Stein, Fuge und über die Fuge hinweg sowie die beobachtbare Rißbildung wurden wie bei den zuvor beschriebenen Experimenten eingesetzt, um das Forschungs- und Ingenieurmodell zu testen. Die mit HGJ-Mörtel verfugte Seite der Wand wurde nach Südwesten ausgerichtet. Die Tiefe der nachträglichen Verfugung betrug etwa 5 cm, bei Fugenbreiten von 1,5 bis 2,5 cm, in Zwickeln auch wesentlich mehr. Die Rückseite der Wand wurde wärmeisoliert. Die Abmessungen der Wand sind in Abb. 66 schematisch wiedergegeben.

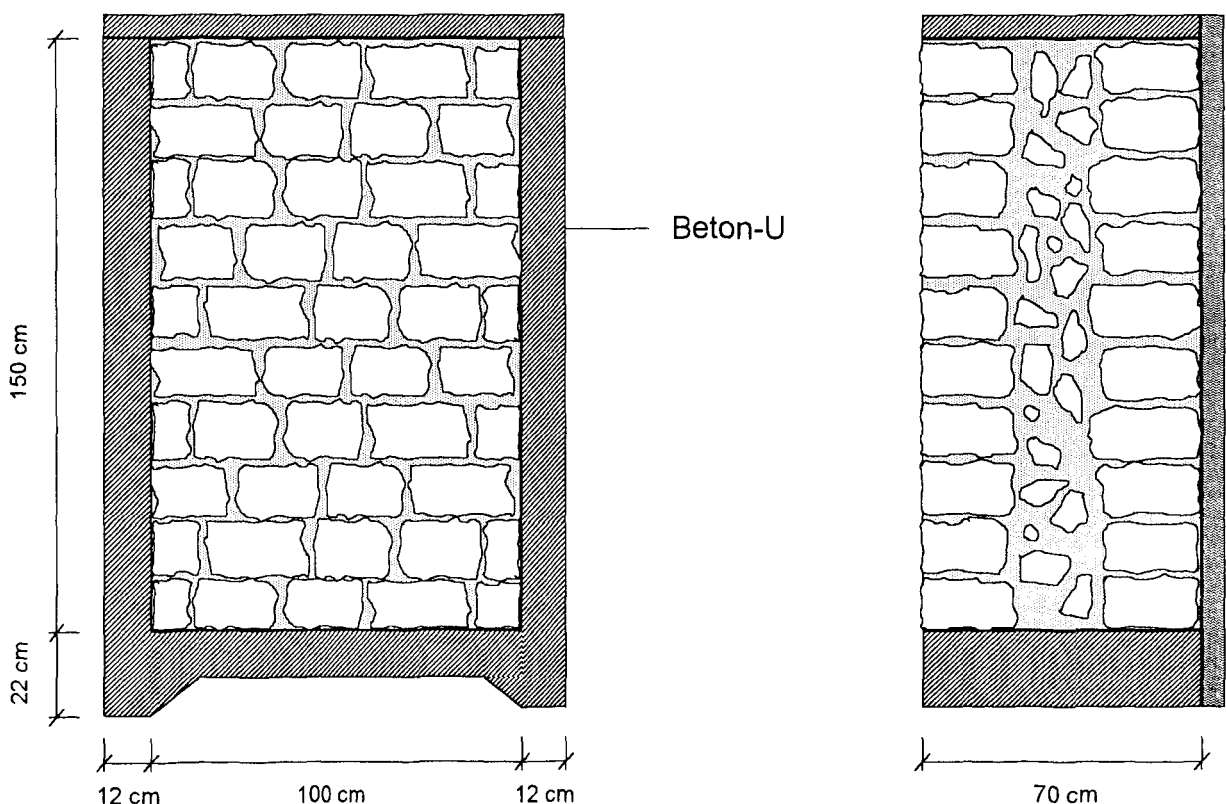


Abb. 66: Wandelement aus Rüthener Grünsandstein (schematisch)

Abbildung 67 zeigt das Mauerwerk im unverfugten Zustand. Zu erkennen sind die Herausführungen von Thermoelementen aus dem mittleren Bereich der Wand. Außerdem ist das Wandelement im verfugten Zustand mit der applizierten Verformungsmeßtechnik abgebildet. Abbildung 68 zeigt

eine Detailaufnahme einer Meßstelle, Abbildung 69 einen Gesamtüberblick mit Meßschrank und Klimameßstation neben der Probewand.

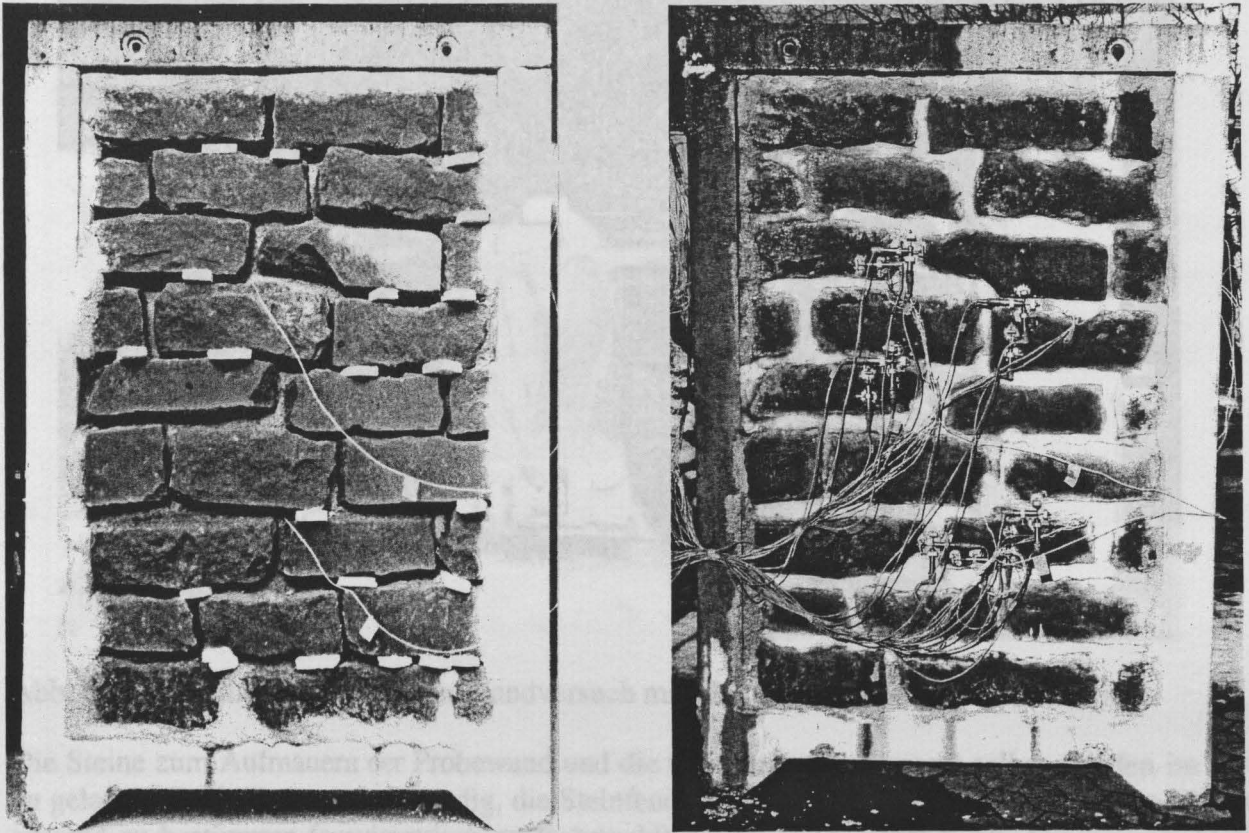


Abb. 67: Links Wandelement im unverfugten Zustand. Rechts Wandelement im verfugten Zustand mit applizierter Verformungsmeßtechnik.

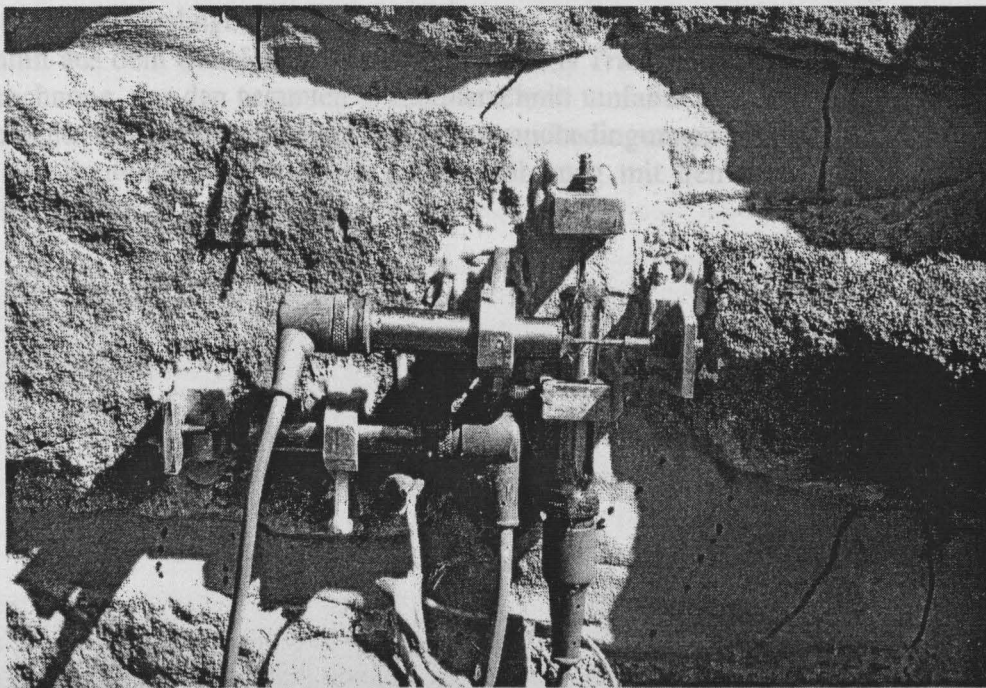


Abb.68: Instrumentierung einer der Prüfstellen der Mauerwerkswand mit 3 Wegaufnehmern zur Messung der Dehnungen im Stein, in der Fuge und über die Fuge hinweg sowie mit Thermoelementen.



Abb. 69: Gesamtüberblick über den Wandversuch mit Meßschrank und Klimameßstation.

Die Steine zum Aufmauern der Probewand und die unverfugte Probewand selbst wurden im Freien gelagert. Deshalb war es notwendig, die Steinfeuchte am Anfang des Prüfzeitraums im Einbauzustand zu bestimmen (gravimetrisch an Bohrmehl). Diese Daten wurden als Ausgangswerte für die Simulationsberechnungen verwendet.

Abbildung 70 zeigt das für den Wandversuch verwendete FE-Netz des Programms Ansys mit den Verformungsrandbedingungen für den Fall einer breiten Fuge. Es handelt sich dabei um einen Ausschnitt aus dem Ortselementnetz des Programms Transreac für die Feuchte- und Wärmetransportberechnung, das den gesamten Wandquerschnitt umfaßte und auf der Außenseite (links) noch Ortselemente zur Berücksichtigung der Klimarandbedingungen umfaßte (Luft). Der Kalkzementmörtel im Bauteilinneren wurde in grober Näherung mit den Materialeigenschaften des HGJ-Mörtels simuliert.

...um nicht zu Vergleichsarbeiten herangezogen, da sie aus den zweidimensionalen Simulationsberechnungen nicht hervorgehen. Die Darstellung beginnt wieder mit den den Zwangsbedingungen zugrundeliegenden Temperatur- und Feuchteänderungen. Sie geht dann über die Verformungen zu den beobachteten Rissen bzw. den berechneten Spannungen.

6.2.1 Verküderungen der Temperatur

Die folgenden Abbildungen zeigen die Temperaturveränderungen während des Wandversuchs und entsprechende berechnete Daten. Die experimentellen Daten wurden über Thermoelemente vom Typ K gemessen. Man erkennt den zu erwartenden mit größerer Tiefe zunehmenden Abfall der Temperaturspitzen. Die Abweichungen zwischen Experiment und Berechnung werden mit zunehmender Tiefe größer, für die hier vorliegende Fragestellung jedoch auch unwichtiger. Die Tagespitzen der Erwärmung werden von der Modellrechnung nicht ausreichend erfüllt, was auf einen nicht ausreichend gut modellierter Einfluß der Strahlungsabsorption hinweist. Da diese kurzfristigen Temperaturmaxima keine vergrößerte Zwängung nach sich ziehen, wurde dem nicht weiter nachgegangen.

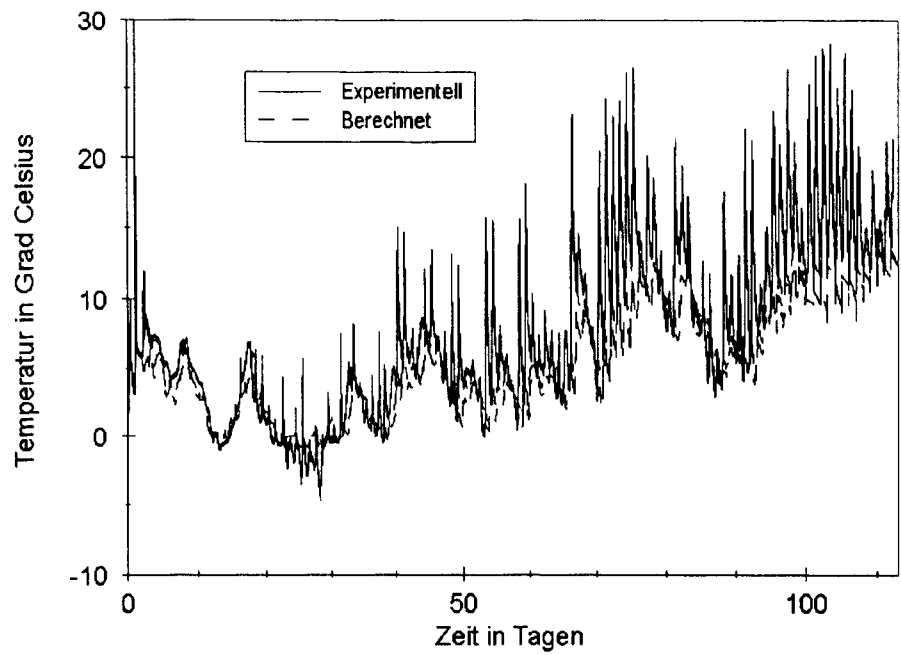


Abb. 71: Temperaturveränderungen während des Wandversuchs in ca. 2,5 cm Tiefe im Mörtel.

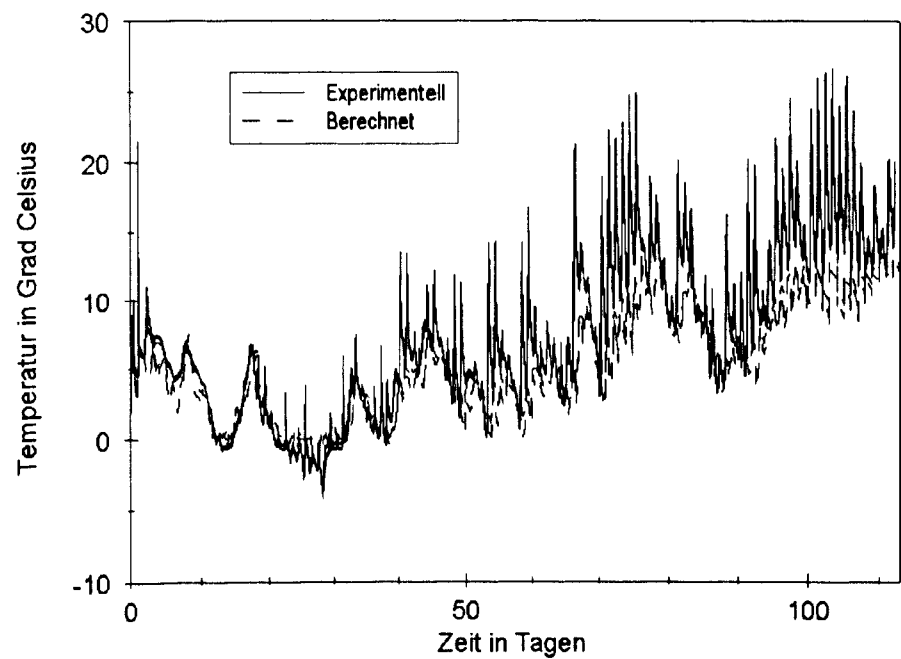


Abb. 72: Temperaturveränderungen während des Wandversuchs in ca. 5 cm Tiefe im Mörtel.

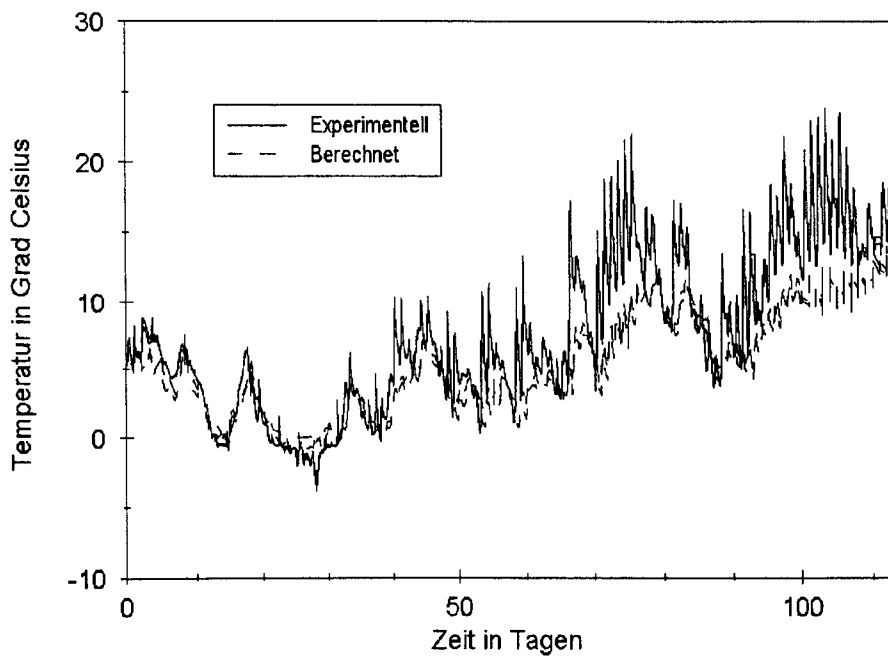


Abb. 73: Temperaturveränderungen während des Wandversuchs in ca. 10 cm Tiefe im Mörtel.

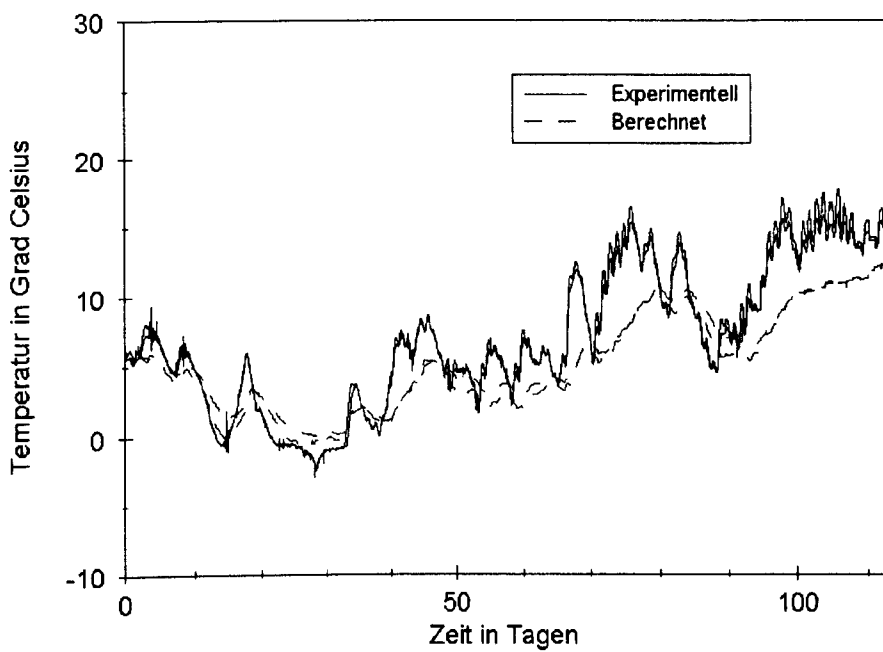


Abb. 74: Temperaturveränderungen während des Wandversuchs in ca. 35 cm Tiefe im Mörtel.

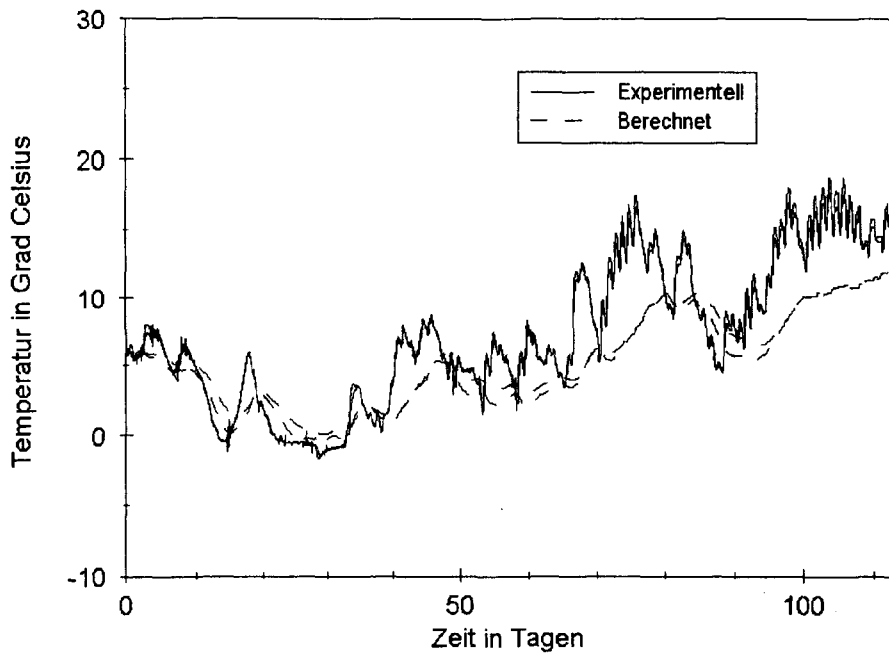


Abb. 75: Temperaturveränderungen während des Wandversuchs in ca. 60 cm Tiefe im Mörtel.

6.2.2 Feuchteprofile in der Mörtelfuge und Stein nach dem Ende des Wandversuchs

Die folgenden Abbildungen zeigen die gemessenen Feuchteprofile in der Mörtelfuge und im Stein (Steinmitte) nach Beendigung der Versuche und entsprechende berechnete Daten. Die experimentellen Daten wurden über gravimetrische Messung an Bohrmehl ermittelt. Insbesondere die experimentelle Messung in der Mörtelfuge ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da sich offensichtlich mikroklimatische Einflüsse wie die „Überdachung“ von Fugenabschnitten durch Steine u.ä. stark bemerkbar machten. Bedeutende Abweichungen zwischen Experiment und Berechnung sind nicht vorhanden, die Steinfouchte konnte sehr gut berechnet werden. Die Ausgangsfeuchte im Stein betrug zwischen 11 Vol.% in 0 bis 1 cm Tiefe ansteigend bis 14 Vol.% in 10 bis 11 cm Tiefe.

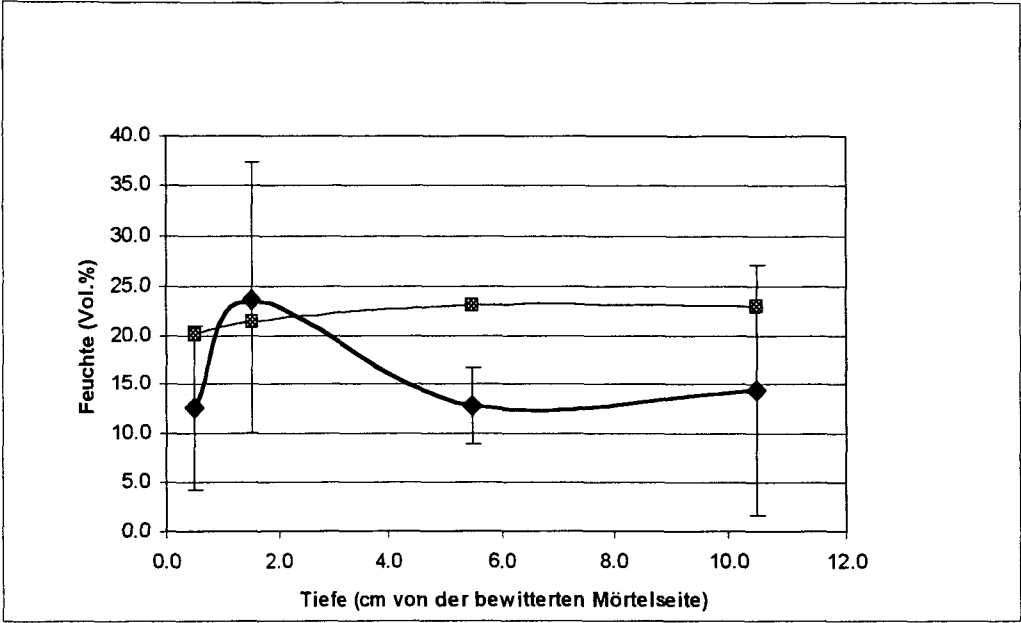


Abb. 76: Gemessenes und berechnetes Feuchteprofil im Mörtel nach Beendigung des Wandversuchs. Experimentelle Kurve mit Fehlerbalken.

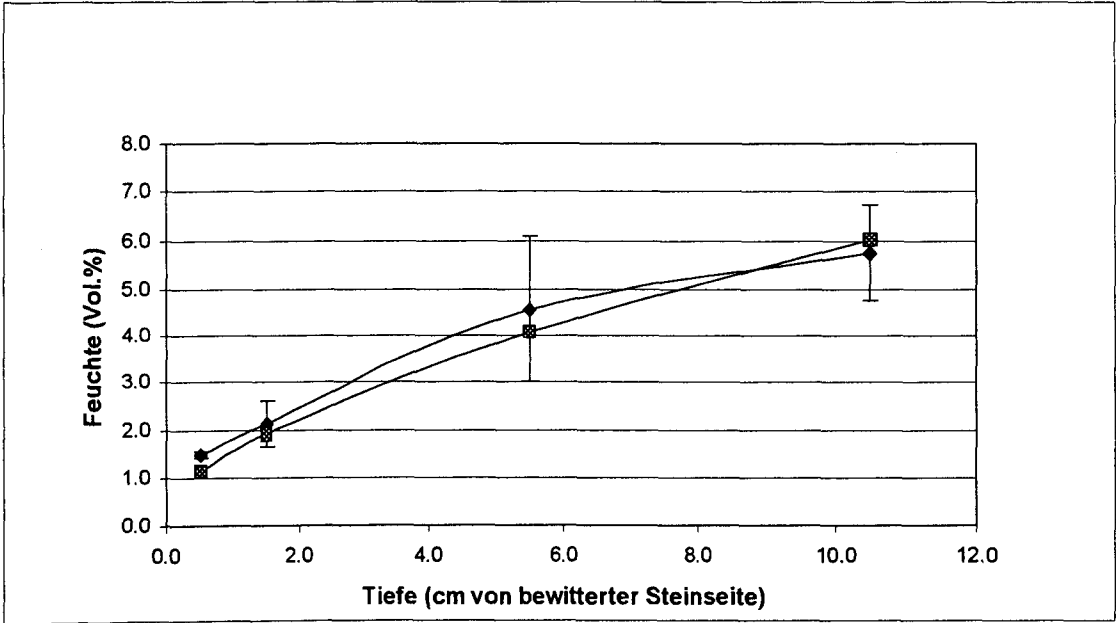


Abb. 77: Gemessenes und berechnetes Feuchteprofil im Stein nach Beendigung des Wandversuchs. Experimentelle Kurve mit Fehlerbalken.

6.2.3 Verformungen im Stein während des Wandversuchs

Die folgende Abbildung zeigt die gemessenen Verformung im Stein während des Versuchs und entsprechende berechnete Daten. Die experimentellen Daten wurden mit Wegaufnehmern gemessen. Die Instrumentierung kann aus Abbildung 68 entnommen werden. Berechnungen unter Berücksichtigung des Kriechens waren aufgrund numerischer Probleme (hohe Kriechrate) nicht

möglich. Die berechneten Ergebnisse enthalten deshalb keine viskosen Verformungen. Die Abbildung zeigt bei der überwiegenden Zahl der Meßstellen eine Stauchung der Steinoberfläche, in einem Fall eine positive Dehnung. Ein Einfluß der Wegaufnehmeranordnung (horizontal-vertikal) war nicht zu erkennen. Die berechneten Dehnungen lagen durchweg im positiven Bereich, wobei die Berechnung mit schmaler Fuge kaum nennenswerte Dehnungen im Stein ergab, was der Hauptmasse der experimentellen Daten mehr entspricht. Die experimentellen Verformungsmessungen wurden auch nicht in Bereichen breiter Fugen durchgeführt.

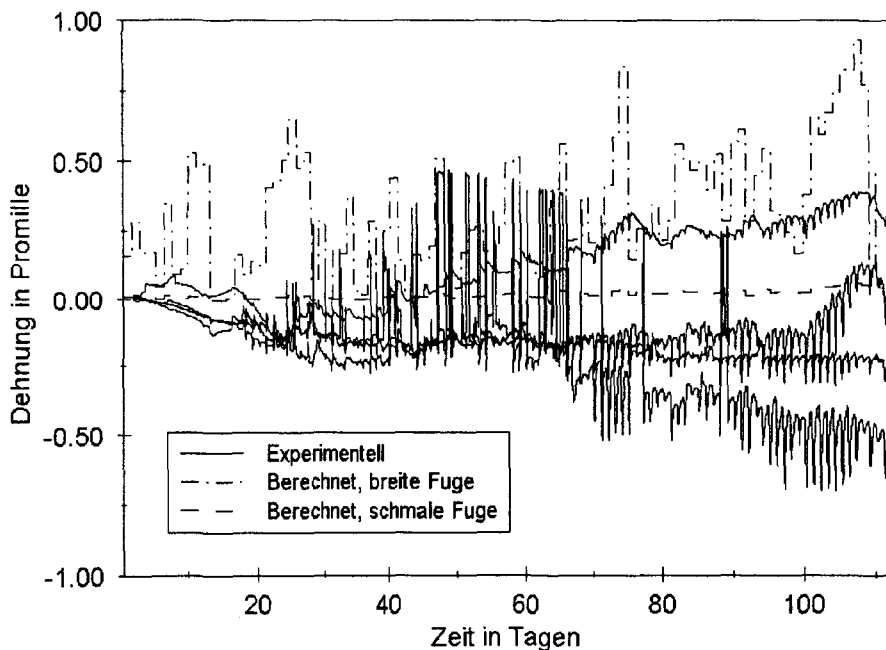


Abb. 78: Verformungen im Stein während des Wandversuchs

6.2.4 Verformungen über die Fuge hinweg während des Wandversuchs

Die folgende Abbildung zeigt die Verformungen über die Fuge hinweg während des Wandversuchs und entsprechende berechnete Daten. Die experimentellen Daten wurden mit Wegaufnehmern gemessen. Die Instrumentierung kann wieder aus Abbildung 68 entnommen werden. Berechnungen unter Berücksichtigung des Kriechens waren aufgrund numerischer Probleme (zu hohe Kriechrate) nicht möglich. Die berechneten Ergebnisse enthalten deshalb keine viskosen Verformungsanteile. Die Messungen zeigen durchweg große positive Dehnungen, im Bereich der Lagerfugen bis ca. 5 Promille, im Bereich von Stoßfugen bis ca. 9 Promille. Dieses Ergebnis war überraschend, da eher mit einem Schwinden zu rechnen war (negative Dehnung). Der Fugenmörtel selbst zeigte längs der Fugen Dehnungen zwischen $-1,5$ und $1,5$ Promille, ohne daß eine Systematik erkennbar war. Eine Erklärung für diese gemessenen Verformungen kann nicht gegeben werden. Die Berechnung (Lagerfuge) ergab sehr geringe Schwinddehnungen.

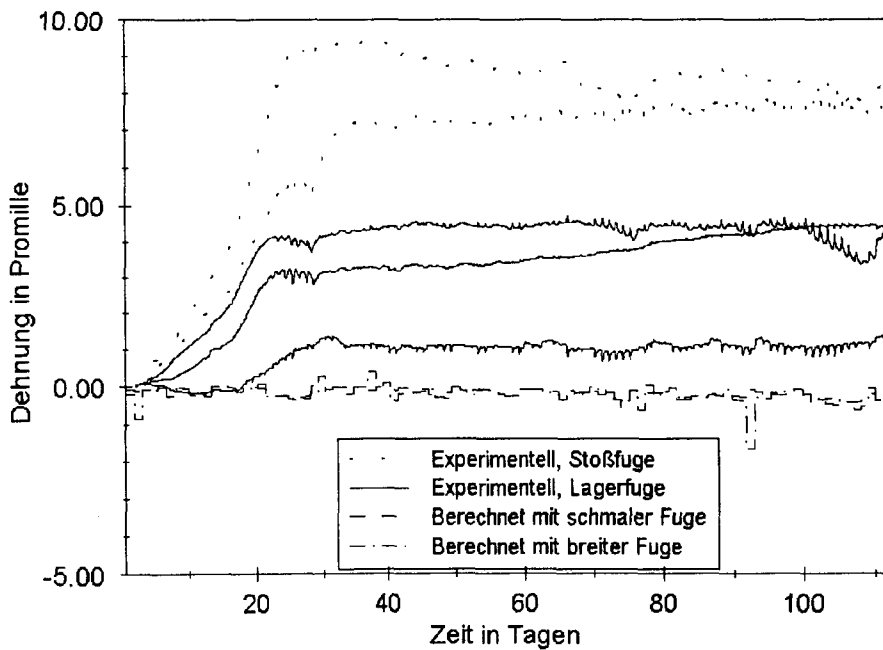


Abb. 79: Verformungen über die Fuge hinweg während des Wandversuchs

6.2.5 Rißbildung und berechnete Spannungen im Falle des Wandversuchs

Experimenteller Befund

Die Rißbildung während des Wandversuchs war gekennzeichnet durch das Auftreten nur sehr weniger Flankenrisse. Sie konnten nur bei sehr breiten Fugen beobachtet werden. In Bereichen breiter Fugen traten auch Mörtellängsrisse auf. In hohem Maße wurden jedoch Durchrisse normal zur Fuge beobachtet. Diese wurden zuerst 10 Wochen nach dem Stopfen festgestellt. Die Anzahl dieser Risse stieg kontinuierlich bis zum Versuchsende an.

Vergleich mit dem Forschungsmodell:

Die Simulationsberechnung ergab im oberflächennahen Fugenbereich Spannungen in y-Richtung von -2 bis 54 N/mm^2 über den simulierten Zeitabschnitt bei Annahme einer schmalen Fuge und $-0,1$ bis 91 N/mm^2 bei Annahme einer breiten Fuge. Berechnungen unter Berücksichtigung des Kriechens waren aufgrund numerischer Probleme (zu hohe Kriechrate) nicht möglich. Die berechneten Ergebnisse enthalten deshalb keine viskosen Verformungsanteile. Man kann jedoch erkennen, daß die berechneten Maximalspannungen auch bei Berücksichtigung einer Relaxation unabhängig von der Fugenbreite weit über der Haftzugfestigkeit des Systems HGJ-Mörtel/Rüthener Grünsandstein lagen. Dies entspricht nicht dem experimentellen Befund.

Vergleich mit dem Ingenieurmodell (s. Tabellenkalkulationen im Anhang)

Zur Durchführung der Berechnungen wurde der Wandversuch in zwei Abschnitte geteilt, 0-40 Tage und 40 Tage bis Ende des Versuchs. Innerhalb dieser Abschnitte wurden jeweils mittlere Temperaturen und relative Feuchten zugrundegelegt sowie der nach der Reifeformel berechnete E-

Modul und die Festigkeit des Mörtels am Ende der Abschnittszeitpunkte. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefaßt.

Tab. 6: Mit dem Ingenieurmodell berechnete Spannungen im Wandversuch

Spannung grundlegend für	0-40 Tage min. Spannung in N/mm^2	0-40 Tage max. Spannung in N/mm^2	40 Tage bis Ende min. Spannung in N/mm^2	40 Tage bis Ende max. Spannung in N/mm^2
Flankenrisse breite Fuge	10,3	30,0	27,6	57,6
Flankenrisse schmale Fuge	0,3	1,44	0,2	1,6
Fugenquerrisse	12,6	25,0	41,3	69,2

Aus Tab. 6 ist ersichtlich, daß Flankenrisse bzw. Längsrisse im Mörtel nur bei ungünstigen, d.h. großen Fugenbreiten prognostiziert werden. Bei schmalen Fugen lagen die berechneten Maximalspannungen nur dann über den Haftzugfestigkeiten, wenn ungünstige Parameterkombinationen angenommen wurden. Auch dann übersteigt die berechnete Spannung nur unwesentlich die Haftzugfestigkeit. Dies entspricht den experimentellen Beobachtungen.

Nach Berechnungen mit dem Ingenieurmodell ist die Bildung von Querrissen im Bereich der Lagerfugen unvermeidbar. Die berechneten Spannungen liegen stets deutlich über der Mörtelzugfestigkeit. Auch dies entspricht dem experimentellen Befund.

6.3 Vergleich der Ergebnisse des Ingenieurmodells mit Erfahrungswerten

In /5/ werden zahlreiche Anforderungen an das Verbundsystem Fugenmörtel/Stein bzw. an seine Verbundpartner formuliert. Diese Erfahrungswerte können als Vergleichsgrößen für das Ingenieurmodell herangezogen werden, obwohl sie für Mauermörtel und nicht speziell für Verfugmörtel aufgestellt wurden. Die Größen werden im folgenden diskutiert.

Dynamischer E-Modul

Das Verhältnis der dynamischen E-Moduli von Mörtel und Stein sollte möglichst klein sein und etwa zwischen 0,2 und 1,0 liegen. Dies deckt sich mit den Aussagen des Ingenieurmodells. Je kleiner der E-Modul des Mörtels ist, umso kleiner ist die sich aufbauende Spannung.

Wärmedehnungskoeffizient

Das Verhältnis der Wärmedehnungskoeffizienten von Mörtel und Stein sollte zwischen 0,5 und 1,5 liegen, möglichst bei 1,0. Auch diese Aussage wird nach den Berechnungen mit dem Ingenieurmodell unterstützt. Generell wird sich eine umso geringere Spannung im Fugenbereich aufbauen umso kleiner der Wärmeausdehnungskoeffizient des Verfugmörtels ist. Eine Verringerung des Wärmeausdehnungskoeffizienten des Verfugmörtels unter den Wert des Steins hat jedoch nur einen sehr kleinen spannungsvermindernden Effekt. Der umgekehrte Fall, der Mörtel hat einen

wesentlich größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als der Stein, führt jedoch zu einer deutlichen Erhöhung der auftretenden Spannungen.

Quellen und Schwinden

Dies sollte nach /5/ $\leq 2 \text{ mm/m}$ betragen. Auch dieses Kriterium wird von dem Ingenieurmodell unterstützt. Die Spannungen nehmen mit ansteigendem Schwinden des Mörtels deutlich zu. Bei wesentlich kleineren Schwindmaßen als 2 mm/m leisten jedoch die unvermeidlichen thermischen Dehnungen einen größeren Anteil zur Zwängungssituation als das Schwinden des Mörtels. Insofern ist der genannte Grenzwert sinnvoll.

Haftzugfestigkeit des Verbundsystems

Diese sollte nach /5/ mindestens $0,1 \text{ N/mm}^2$ betragen. Dies ist nach den durchgeführten Berechnungen mit dem Ingenieurmodell als zu niedrig zu bewerten. So beträgt nach /9/ die empfohlene Mindesthaftzugfestigkeit eines Fugenmörtels gegenüber der Steinoberfläche $0,4$ bis $0,6 \text{ N/mm}^2$. Diese Werte können nach den durchgeführten Berechnungen in vielen Fällen ausreichen, jedoch können u.U. viel höhere Spannungen auftreten.

7. Diskussion

Es wurde ein Forschungs- und ein Ingenieurmodell zur Prognose der Rißbildung im Bereich von Neuverfugungen von Natursteinmauerwerk erstellt. Das Ingenieurmodell wurde nicht aus dem Forschungsmodell abgeleitet sondern stellt eine parallele Entwicklung auf der Basis sehr stark vereinfachter Randbedingungen dar. Die Funktion der Modelle wurde anhand experimenteller Versuche an gezwängten Zwei-Stein-Körpern und einer dreischaligen Probewand untersucht. Zur Überprüfung der Modelle wurden die Feuchteprofile am Ende der Versuche, die Entwicklung der Temperaturprofile, die Verformungen in Stein und über die Fuge hinweg sowie die beobachtbare Rißbildung herangezogen. Als Eingangsdaten für die Modelle wurden materialspezifische Kenngrößen sowie die klimatischen Randbedingungen der Versuche bestimmt.

Die Anwendung des Forschungsmodells auf die experimentellen Versuche ergab, daß die Materialfeuchten am Ende der Versuche sowie die Temperaturprofile gut bis zufriedenstellend simuliert werden konnten. Bei den Verformungen waren die Abweichungen sehr viel größer. Die mit dem Forschungsmodell berechneten Spannungskomponenten in y-Richtung waren stets deutlich größer als die Haftzugfestigkeit. Dies widerspricht dem experimentellen Ergebnis des Wandversuchs bei dem nur bei sehr breiten Fugen eine Flankenrißbildung beobachtet werden konnte. Das Forschungsmodell überschätzt die Gefahr der Rißbildung. Der auf den FEM-Berechnungen beruhende Teil des Forschungsmodells muß deshalb z.Zt. als unbefriedigend bezeichnet werden. Eine deutlich leistungsfähigere Simulation der Rißgefährdung auf der Basis des vorgestellten Forschungsmodells erfordert bei der FEM-Analyse einen deutlich größeren Aufwand als hier beschrieben und im Rahmen des Projektes innerhalb einer ersten Förderperiode möglich war (Materialgesetze, Verformungsrandbedingungen, örtliche und zeitliche Auflösung).

Zwischen den Ergebnissen des Ingenieurmodells und den experimentellen Untersuchungen waren dagegen nur wenige Widersprüche erkennbar. Die Flankenrißbildung bei den Versuchen 1 bis 3 wurde i.w. richtig prognostiziert. Die im Hinblick auf eine Rißvermeidung deutlich besseren Eigenschaften des Rütthener Grünsandsteins traten in Experiment und Berechnung deutlich zutage. Das Ingenieurmodell prognostizierte auch richtig, daß im Wandversuch nur bei sehr breiten Fugen eine Flankenrißbildung bzw. Rißbildung längs der Fuge auftrat, jedoch stets Risse normal zur Fuge. Der einzige Widerspruch bestand darin, daß die Berechnung für die Innenseite der Probekörper bei der Versuchsserie 3 eine Rißbildung prognostizierte, jedoch nur bei einem Teil der Versuchskörper tatsächlich Risse auftraten. Auch das Ingenieurmodell überschätzte offensichtlich die Gefahr der Rißbildung, allerdings in wesentlich geringerem Maße als das Forschungsmodell.

Das Ingenieurmodell muß aufgrund der großen Streuungen der Eigenschaften von Natursteinen und der stark vereinfachten Randbedingungen naturgemäß halbquantitativ sein. Die einfach zu bedienende Tabellenkalkulation mit Hilfetexten kann jedoch wichtige Hinweise darauf geben, welche Eigenschaften ein Mörtel für eine konkrete Neuverfugung haben muß um im Zusammenhang des Stein/Mörtel-Verbundsystems ohne Risse und insbesondere ohne Flankenrisse zu bleiben. Problematische Stein/Mörtel-Kombinationen werden deutlich erkannt, Auswirkungen einer Mörtelmodifikation auf die zu erwartenden Spannungen werden quantifizierbar.

Die Wahl des modifizierten HGJ-Mörtels als Versuchsmaterial hat sich im nachhinein als sehr ungünstig herausgestellt weil dieser Mörtel ein sehr hohes Schwindmaß aufwies. Worauf dies zurückzuführen ist, blieb unklar. Eventuell hatten die verwendeten Komponenten des Mörtels ein zu hohes Alter, so daß die Quellkomponente nicht mehr ausreichend wirksam wurde. So trat bei allen Versuchen mit Zwei-Stein-Körpern eine Flankenrißbildung auf. Lediglich während des Wandver-

suchs war die Flankenrißbildung nahezu unbedeutend. Für die Überprüfung der Modelle wäre es günstiger gewesen, wenn die Rißbildung während der experimentellen Versuche stärker differenziert gewesen wäre und die Schwinddehnung gegenüber der Temperaturdehnung nicht eine zu dominierende Rolle eingenommen hätte.

Weiterführende Forschung ist wünschenswert im Hinblick auf:

- Eine Verbesserung des Forschungsmodells vor allem im Bereich der Spannungsanalyse mit FEM.
- Eine verbreiterte experimentelle Basis zur Verifikation der Modelle. Die beiden hier verwendeten Natursteine sind für die experimentelle Verifikation sehr gut geeignet, da sie einen weiten Bereich möglicher Gesteinseigenschaften abdecken. Notwendig ist jedoch die Variation der Mörtel Eigenschaften und die Verwendung von Mörteln mit geringerem Schwinden. Die Durchführung von Laborexperimenten unter möglichst konstanten Klimarandbedingungen hat sich als wenig effektiv herausgestellt, da sie zu zeit- und kostenintensiv sind. Sinnvoller ist es, Experimente mit Stein/Mörtel-Verbundkörpern unter freier Bewitterung durchzuführen und die Klimarandbedingungen am Ort der Proben aufzuzeichnen. Um definierte mechanische Randbedingungen zu schaffen, können Zwei-Stein-Körper ganz oder teilweise in einen ausreichend steifen, temperierten Rahmen eingeklebt werden der keine Temperaturverformung zeigt oder es sollten größere Wandabschnitte erstellt werden.

8. Literatur

- /1/ Alfes, Ch.: Bruchmechanisches Werkstoffverhalten von Sandstein unter Zugbeanspruchung. Aachener Beiträge zur Bauforschung, Band 1, zgl. Dissertation, Aachen, 1993
- /2/ Alfes, Ch.; Schießl, P.: Spannungsdehnungsverhalten, Schwinden und Kriechen von Sandsteinen. In: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall und Steinkonservierung, S.3-17, Ernst und Sohn, Berlin, 1994
- /3/ Fecker, E.; Reik, G.: Baugeologie. Enke, Stuttgart, 1987
- /4/ Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsheft 50, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München, 1990
- /5/ Knöfel, D.; Schubert, P. (Hrsg.): Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsmaterialien in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege, Ernst&Sohn Berlin, 1993
- /6/ Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995
- /7/ Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- /8/ Pressbau GmbH, Oberhausen, Information
- /9/ Rinne, A.; Marzaganov, R.; Rostásy, F.S.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörteln und Naturstein unter Bewitterung. Berichte zur Denkmalpflege-Forschung, MPA Braunschweig, 1994
- /10/ Rinne, A.; Rostásy, F.S.: Zur Neuverfugung an der St. Johannis Kirche in Ellrich. Berichte zur Denkmalpflege-Forschung. Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie, Vorhaben BAU 7025 B. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 1995
- /11/ Rinne, A.; Warnecke, P.; Rostásy, F.S.: Zur Dauerhaftigkeit von Verfugungen unter thermisch-hygrischer Einwirkung. In: Wiss. Zeitschrift der HAB Weimar, Heft 5/6/7/1994, anlässlich der 12. Int. Baustofftagung ibausil in Weimar, 1994
- /12/ Rostásy, F.S.; Weiß, D.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörtel und Natursteinen. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, MPA Braunschweig, 1992
- /13/ Schmidt-Döhl, F.: Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996
- /14/ Schmidt-Döhl, F.; Rostásy, F.S.: A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral building materials. I. Simulation model. Cement and Concrete Research, Bd. 29, S. 1039-1046, 1999, II. Experimental Verification. Cement and Concrete Research, Bd. 29, S. 1047-1054, 1999
- /15/ Warnecke, P.; Weiß, D.; Rostásy, F.S.: Zur Haftzugfestigkeit zwischen HGZ-LCF-Fugenstopfmörtel und Naturstein. 3. Int. Koll. „Werkstoffwissenschaften und Bausanierung“, Esslingen 1992
- /16/ Weber, N.: Über den Einfluß der Fugentiefe auf die Eigenschaften von Fugenmörtel aus bewitterten Naturstein-Mörtel-Verbundkörpern. Großer Entwurf in der Vertiefungsrichtung Baustofftechnologie an der TU Braunschweig, 1994
- /17/ Zscheile, H.: Eigenschaften und Verarbeitung faserbewehrter Fugenmörtel. In: Rostásy, F.S.; Wigger, H. (Hrsg.): Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk. Tagung Braunschweig 1997. Heft 135 der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, S.175-190, 1997

Anhang

Anhang A: Berechnungen mit dem Ingenieurmodell

Anhang B: Hilfetexte zum Ingenieurmodell

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 1a Harzer Dolomit minimale Spannung, 2 Wochen nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.128 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 3.30E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 21500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 9180 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 7.28 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 306 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.22E-04	0.4224 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.97E-04	0.3970 Elastische Dehnung
2.54E-05	0.0254 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 24.24 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.30E-03	3.3000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.64E-03	2.6400 Elastische Dehnung
6.60E-04	0.6600 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 1a Harzer Dolomit maximale Spannung, 2 Wochen nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.128 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 4 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 81500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 9180 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 28.98 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 149 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
2.15E-05	0.0215 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
7.94E-04	0.7936 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
7.14E-04	0.7141 Elastische Dehnung
1.01E-04	0.1010 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 45.92 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
5.32E-05	0.0532 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
5.00E-03	5.0026 Elastische Dehnung
1.25E-03	1.2506 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 1b Rütthener Grünsandstein minimale Spannung, 2 Wochen nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke (am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 3.30E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 9180 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 1.18 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 3673 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.30E-04	0.2303 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.95E-04	0.1951 Elastische Dehnung
3.53E-05	0.0353 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 24.24 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.30E-03	3.3000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.64E-03	2.6400 Elastische Dehnung
6.60E-04	0.6600 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 1b Rütthener Grünsandstein maximale Spannung, 2 Wochen nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 4 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 9180 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 6.31 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 242 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
3.46E-05	0.0346 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.33E-04	0.4328 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.55E-04	0.4554 Elastische Dehnung
1.20E-05	0.0120 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 45.92 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
5.32E-05	0.0532 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
5.00E-03	5.0026 Elastische Dehnung
1.25E-03	1.2506 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 2a Harzer Dolomit minimale Spannung, 1 Woche nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 3.30E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 21500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 7200 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 4.16 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 331 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.30E-04	0.2303 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.20E-04	0.2203 Elastische Dehnung
1.01E-05	0.0101 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 19.01 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.30E-03	3.3000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.64E-03	2.6400 Elastische Dehnung
6.60E-04	0.6600 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 2a Harzer Dolomit maximale Spannung, 1 Woche nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 1 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 81500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 7200 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 18.60 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 153 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
4.84E-06	0.0048 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.33E-04	0.4328 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.93E-04	0.3925 Elastische Dehnung
4.51E-05	0.0451 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 35.79 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
1.33E-05	0.0133 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.97E-03	4.9706 Elastische Dehnung
1.24E-03	1.2427 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 2b Rütthener Grünsandstein minimale Spannung, 2 Wochen nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 3.30E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 9900 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 1.18 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 3673 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.30E-04	0.2303 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.95E-04	0.1951 Elastische Dehnung
3.52E-05	0.0352 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 26.14 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.30E-03	3.3000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.64E-03	2.6400 Elastische Dehnung
6.60E-04	0.6600 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 2b Rühener Grünsandstein maximale Spannung, 2 Wochen nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 1 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 9900 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 5.20 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 268 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
8.65E-06	0.0086 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.33E-04	0.4328 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.73E-04	0.3726 Elastische Dehnung
6.88E-05	0.0688 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 49.21 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
1.33E-05	0.0133 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.97E-03	4.9706 Elastische Dehnung
1.24E-03	1.2427 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3a Harzer Dolomit minimale Spannung, "Außenseite", 12 Tage nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 11 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 2.50E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 21500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 5800 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 3.85 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 341 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
5.00E-05	0.0500 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.75E-04	0.1745 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.13E-04	0.2129 Elastische Dehnung
1.16E-05	0.0116 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 12.06 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
1.00E-04	0.1001 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.50E-03	2.5000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.08E-03	2.0801 Elastische Dehnung
5.20E-04	0.5200 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3a Harzer Dolomit minimale Spannung, "Innenseite", 12 Tage nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 3 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 21500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 7900 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 8.22 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 158 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrisse

Einheitslos	Promille
1.36E-05	0.0136 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.33E-04	0.4328 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.28E-04	0.4282 Elastische Dehnung
1.82E-05	0.0182 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 39.36 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
2.73E-05	0.0273 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.98E-03	4.9818 Elastische Dehnung
1.25E-03	1.2455 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3a Harzer Dolomit maximale Spannung, "Außenseite", 12 Tage nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 13 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 2.50E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 81500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 5800 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke.
Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 8.97 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 286 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
6.29E-05	0.0629 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.75E-04	0.1745 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.10E-04	0.2104 Elastische Dehnung
2.70E-05	0.0270 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 12.40 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
1.73E-04	0.1729 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.50E-03	2.5000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.14E-03	2.1383 Elastische Dehnung
5.35E-04	0.5346 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3a Harzer Dolomit maximale Spannung, "Innenseite", 12 Tage nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 4.20E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 5 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 81500 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 7900 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 0.75 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 20.35 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 146 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
2.42E-05	0.0242 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.33E-04	0.4328 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.12E-04	0.4120 Elastische Dehnung
4.49E-05	0.0449 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 39.60 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
6.65E-05	0.0665 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
5.01E-03	5.0132 Elastische Dehnung
1.25E-03	1.2533 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3b Rütthener Grünsandstein minimale Spannung, "Außenseite", 12 Tage nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 11 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 2.50E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 5800 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 1.33 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 1543 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
9.19E-05	0.0919 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.75E-04	0.1745 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.25E-04	0.2253 Elastische Dehnung
4.11E-05	0.0411 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 12.06 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
1.00E-04	0.1001 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.50E-03	2.5000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.08E-03	2.0801 Elastische Dehnung
5.20E-04	0.5200 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3b Rühthener Grünsandstein minimale Spannung, "Innenseite", 5 Tage nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 3 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 3500 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 2.17 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 378 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrisse

Einheitslos	Promille
2.51E-05	0.0251 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.33E-04	0.4328 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.86E-04	0.3861 Elastische Dehnung
7.17E-05	0.0717 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 17.44 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
2.73E-05	0.0273 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.98E-03	4.9818 Elastische Dehnung
1.25E-03	1.2455 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3b Rütthener Grünsandstein maximale Spannung, "Außenseite", 8 Wochen nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 25 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 2.50E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 7400 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke.
Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 4.45 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 313 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
2.16E-04	0.2162 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.75E-04	0.1745 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.29E-04	0.3292 Elastische Dehnung
6.15E-05	0.0615 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 16.77 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
3.33E-04	0.3325 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.50E-03	2.5000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.27E-03	2.2660 Elastische Dehnung
5.67E-04	0.5665 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Versuch 3b Rüthener Grünsandstein maximale Spannung, "Innenseite", 5 Tage nach Stopfen

Allgemeine Daten:

- 0.0698 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 5 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.20E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 3500 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 0.00 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 4.71 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 245 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
4.32E-05	0.0432 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.33E-04	0.4328 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.98E-04	0.3985 Elastische Dehnung
7.75E-05	0.0775 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 17.55 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 0 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
6.65E-05	0.0665 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.20E-03	6.2000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
5.01E-03	5.0132 Elastische Dehnung
1.25E-03	1.2533 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 0 bis 40 Tage, minimale Spannung, breite Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.82 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0.5 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 2.50E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 6274 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 1.87 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 10.31 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 560 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
4.48E-06	0.0045 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.05E-03	2.0500 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.66E-03	1.6618 Elastische Dehnung
3.93E-04	0.3927 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 12.57 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 933 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
4.55E-06	0.0046 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.50E-03	2.5000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.00E-03	2.0036 Elastische Dehnung
5.01E-04	0.5009 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 0 bis 40 Tage, maximale Spannung, breite Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.82 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 2 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 4.96E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 6274 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 1.87 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 22.98 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 277 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
2.48E-05	0.0248 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.07E-03	4.0672 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.29E-03	3.2903 Elastische Dehnung
8.02E-04	0.8017 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 25.03 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 469 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
2.66E-05	0.0266 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.96E-03	4.9600 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.99E-03	3.9893 Elastische Dehnung
9.97E-04	0.9973 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 0 bis 40 Tage, minimale Spannung, schmale Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.021 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0.5 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 2.50E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 6274 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 1.87 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 0.28 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 182 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
4.16E-06	0.0042 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
5.25E-05	0.0525 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.81E-05	0.0481 Elastische Dehnung
8.60E-06	0.0086 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 12.57 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 933 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
4.55E-06	0.0046 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.50E-03	2.5000 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.00E-03	2.0036 Elastische Dehnung
5.01E-04	0.5009 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 0 bis 40 Tage, maximale Spannung, schmale Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.021 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 2 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 4.96E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 6274 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 1.87 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 1.44 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 877 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
1.68E-05	0.0168 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.04E-04	0.1042 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.02E-04	0.1024 Elastische Dehnung
1.85E-05	0.0185 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 25.03 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 469 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
2.66E-05	0.0266 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.96E-03	4.9600 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.99E-03	3.9893 Elastische Dehnung
9.97E-04	0.9973 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 40 Tage bis Versuchsende, minimale Spannung, breite Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.82 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 6 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 3.74E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 14010 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 3.22 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 27.62 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 379 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
-5.37E-05	-0.0537 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.07E-03	3.0668 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.46E-03	2.4593 Elastische Dehnung
5.54E-04	0.5537 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 41.31 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 1092 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
-5.46E-05	-0.0546 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.74E-03	3.7400 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.95E-03	2.9483 Elastische Dehnung
7.37E-04	0.7371 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 40 Tage bis Versuchsende, maximale Spannung, breite Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.82 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.17E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 14010 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 3.22 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 57.57 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 224 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
5.06E-03	5.0594 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.09E-03	4.0893 Elastische Dehnung
9.70E-04	0.9701 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 69.15 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 652 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.17E-03	6.1700 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.94E-03	4.9360 Elastische Dehnung
1.23E-03	1.2340 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 40 Tage bis Versuchsende, minimale Spannung, schmale Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.021 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke
(am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 9.10E-06 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 6 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 3.74E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 5900 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 14010 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw.
-auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke.
Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 3.22 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 0.15 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke
in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 155 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-,
Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
-4.99E-05	-0.0499 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
7.85E-05	0.0785 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.43E-05	0.0243 Elastische Dehnung
4.33E-06	0.0043 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 41.31 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 1092 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
-5.46E-05	-0.0546 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
3.74E-03	3.7400 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
2.95E-03	2.9483 Elastische Dehnung
7.37E-04	0.7371 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Ingenieurmodell der Mörteloptimierung zur Vermeidung von Rissen

Kommentar:

Wandversuch 40 Tage bis Versuchsende, maximale Spannung, schmale Fuge

Allgemeine Daten:

- 0.021 Flächenanteil der Fugen normal zur interessierenden Fugenflanke (am Bauwerk bestimmen, 0...1)
- 8.30E-06 lineare Wärmedehnzahl des Steins in 1/K
- 1.33E-05 lineare Wärmedehnzahl des Mörtels in 1/K
- 0 maximale Temperaturdifferenz im Mauerwerk in K
- 0.00E+00 Endschwindmaß des Steins (einheitslos)
- 6.17E-03 Endschwindmaß des Mörtels (einheitslos)
- 14400 Zug-E-Modul des Steins in N/mm²
- 0.1775 relevante Zugkriechzahl des Steins (einheitslos)
- 0.25 relevante Zugkriechzahl des Mörtels (einheitslos)

Alternative Eingaben zur Festigkeit und E-Modul

- 14010 statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm², Vorgabe der Mörtelentwicklung bzw. -auswahl bei Bestimmung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit
- 1.10 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit in N/mm² normal zur Fugenflanke. Vorgabe der Mörtelentwicklung bei Bestimmung des max. E-Moduls des Mörtels
- 3.22 Mindestmörtelzugfestigkeit in N/mm² (nur wichtig für Risse normal zur Fuge)

Ende Dateneingabezone, Anfang berechneter Daten*****

Datenausgabe im Hinblick auf Flankenrisse

- 1.58 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 696 Maximaler E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit (Bei negativen Werten besteht keine Problematik)

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Flankenrissen

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.30E-04	0.1296 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
1.10E-04	0.1099 Elastische Dehnung
1.97E-05	0.0197 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Datenausgabe im Hinblick auf Mörtelrisse normal zur Fuge

- 69.15 Mindestwert der Mörtelzugfestigkeit in N/mm² bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels
- 652 Maximal. E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe der Mindestmörtelzugfestigkeit

Ausgaben der Teildehnungen Prognose von Mörtelrissen normal zur Fuge

Einheitslos	Promille
0.00E+00	0.0000 Max. thermische Dehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
6.17E-03	6.1700 Max. Schwinddehnung gegenüber dem zwängenden Mauerwerk
4.94E-03	4.9360 Elastische Dehnung
1.23E-03	1.2340 Kriechdehnung zum relevanten Zeitpunkt

Bedienungshinweise zur Tabellenkalkulation

Die Anwendung des Ingenieurmodells setzt die ordnungsgemäße Vorbereitung der zu verfügbaren Fläche incl. Vornässen der Steine sowie eine ordnungsgemäße und auf die Erhärtungseigenschaften des Mörtels abgestimmte Nachbehandlung voraus (s. z.B. /33,23/).

1 FLÄCHENANTEIL DER FUGEN NORMAL ZUR INTERESSIERENDEN FUGENFLANKE (AM BAUWERK BESTIMMEN, 0...1)

Dieser Parameter ist durch Ausmessen der Stein- und Fugenabmessungen am Bauteil zu ermitteln. Das Ingenieurmodell sollte dabei sowohl auf den kleinsten als auch den größten gemessenen Flächenanteil angewendet werden.

2 LINEARE WÄRMEDEHNZAHL, STEIN

Die folgenden Tabellen zeigen lineare Wärmedehnzahlen nach verschiedenen Quellen (s senkrecht zur Schichtung, p parallel zur Schichtung).

Gesteinsgruppe / Gestein	Lineare Wärmedehnzahl in 1/K, zu multiplizieren mit 10 ⁻⁶			
Magmatische Gesteine				
Granit	8-10 /21/ 5-11 /35/	7 /17/	8 /19/	3,7-6,0 /18/
Diabas	8-10 /21/	7,5 /19/2-3 /18/4-7 /35/		
Gabbro	8-10 /21/	8,8 /19/2-3 /18/4-8 /35/		
Syenit	8 /19/	3,7 /18/5-11 /35/		
Diorit	8,8 /19/	2-3 /18/	4-8 /35/	
Andesit	5,3 /19/			
Porphyre	5 /35/			
Quarzporphyr	12,5 /19/			
Porphyrit	12,5 /19/			
Trachyt	10 /19/	2,7-5,1 /18/	12,5 /35/	
Londorfer Basaltlava	6,7 /38/			
Basalt	8-10 /21/	9 /19/	0,7-1,2 /18/	5-8 /35/
Sedimentgesteine				
Grauwacke	8-10 /21/	10-12 /35/		
Kalkstein allgemein	8-10 /21/	7 /19/	1,7-6,8 /18/	4-12 /35/
Reine Kalksteine	3,5-6,0; Mittel 4,5; 0-30 °C; 4,0-6,5; Mittel 5,0; 30-60 °C /24/			
Verunreinigte Kalksteine	bis 11,0; 0-30 °C; bis 11,5 30-60 °C /24/			
Dichter Kalkstein	6 /17/	7,5 /19/-	5-10 /35/	
Travertin	6,8 /19/-	4-12 /35/		
Halberstädter Muschel- kalk	6,74 s -20 bis 20 °C; 4,38 s 20 bis 60 °C; 4,95 p -20 bis 20 °C; 3,34 p 20 bis 60 °C /22/			
Dolomit	8-10 /21/	7,5 /19/2,6 /18/7,0-10,0; Mittel 8,5; 0-60 °C /24/ 5-10 /35/		
Harzer Dolomit	4,2±0,6 Rinne in /20/			
Magnesitgestein	7,0-10,0; Mittel 8,5; 0-60 °C /24/			
Naturbims	8-10 /21/			
Lavaschlacke	8-10 /21/			
Tuffe	8-10 /21/	6-10 /35/		
Rochlitzer Porphyrtuff	7,29 s -20 bis 20 °C; 5,43 s 20 bis 60 °C; 7,29 p -20 bis 20 °C; 5,43 p 20 bis 60 °C /22/			
Sandstein	12 /19/	3,7-6,3 /18/	10,0-12,5; Mittel 11,0; 0-60 °C /24/ 8-12 /35/	
Rüthener Grünsandstein	8,3±0,8 Rinne in /20/			

Anhang B2

Cottaer Sandstein	10,27 s -20 bis 20 °C; 10,67 s 20 bis 60 °C; 11,92 p -20 bis 20 °C; 9,94 p 20 bis 60 °C /22/
Postaer Sandstein	11,21 s -20 bis 20 °C; 10,40 s 20 bis 60 °C; 10,04 p -20 bis 20 °C; 6,41 p 20 bis 60 °C /22/
Wendischkarsdorfer	12,51 s -20 bis 20 °C; 12,71 s 20 bis 60 °C; 12,19 p -20 bis 20 °C; 11,81 p 20 bis 60 °C /22/
(Oelsaer) Sandstein	
Zwickauer Kohle- sandstein	10,50 s -20 bis 20 °C; 15,21 s 20 bis 60 °C; 11,05 p -20 bis 20 °C; 6,83 p 20 bis 60 °C /22/
Zeitzer Sandstein	9,09 s -20 bis 20 °C; 8,61 s 20 bis 60 °C; 8,79 p -20 bis 20 °C; 8,90 p 20 bis 60 °C /22/
Ummendorfer Sandstein	10,18 s -20 bis 20 °C; 12,71 s 20 bis 60 °C; 10,68 p -20 bis 20 °C; 12,81 p 20 bis 60 °C /22/
Roter Mainsandstein	9,2 /38/
Quarzitischer Sandstein	12 /21/ 9 /17/ 10,5-12; Mittel 11,8; 0-60 °C /24/ 8-12 /35/
Metamorphe Gesteine	
Gneis	8-10 /21 1,3-4,4 /18/
Quarzit	8-10 /21 12,5 /19/ 6 /18/ 10-12 /35/
Marmor	8-10 /21 4,5-4,9 /18/ 5-10 /35/
Serpentin	8-10 /21

Weitere Daten für Anröchter Dolomit, Bucher Sandstein, Cottaer Sandstein, Ihrlersteiner Grünsandstein, Krensheimer Muschelkalk, Halberstädter Muschelkalk, Obernkirchner Sandstein, Postaer Sandstein, Ruhrsandstein, Sander Schilfsandstein, Schaumkalk Naumburg, Udelfanger Sandstein, Wüstenzeller Sandstein und Zeitzer Sandstein findet man in /25/

3 LINEARE WÄRMEDEHNZAHL, MÖRTEL

Die folgende Tabelle zeigt Daten aus verschiedenen Quellen.

Mörtel	Lineare Wärmedehnzahl in 1/K, zu multiplizieren mit 10 ⁻⁶
Hydraulischen Kalkmörtel MG II	12 /17/
Mineros A, Fa. Krusemark	-20 bis 20 °C 10; 20 bis 50 °C 13 /23/
Restaurations-Fugenmörtel, Fa. Quickmix	-20 bis 20 °C 9; 20 bis 50 °C 11,8 /23/
Zementmörtel	10 /17/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.)	-10 bis 20 °C 9,6; 20 bis 60 °C 9,2 /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.), fließfähig durch Wasserzugabe	-10 bis 20 °C 9,9; 20 bis 60 °C 9,1 /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.), fließfähig durch Fließmittel	-10 bis 20 °C 9,7; 20 bis 60 °C 9,5 /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:3,6 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 9,5; 20 bis 60 °C 9,0 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand, (1:3,8 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 10,2; 20 bis 60 °C 9,4 /38/
Weißkalkhydrat, Hochofenzement und Traßzement, Sand, (1:3,7 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 9,8; 20 bis 60 °C 9,6 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand, (1:3,8 Gew.)	-10 bis 20 °C 10,4; 20 bis 60 °C 8,5 /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.)	-10 bis 20 °C 9,8; 20 bis 60 °C 11,3 /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.), fließfähig durch Wasserzugabe	-10 bis 20 °C 6,6; 20 bis 60 °C 7,9 /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.), fließfähig durch Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,7; 20 bis 60 °C 13,1 /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.)	-10 bis 20 °C 6,3; 20 bis 60 °C 6,7 /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:0,9 Gew.)	-10 bis 20 °C 6,2; 20 bis 60 °C 6,9 /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.)	-10 bis 20 °C 7,9; 20 bis 60 °C 8,2 /38/

Anhang B3

Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.)	-10 bis 20 °C 5,5; 20 bis 60 °C 6,3 /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.)	-10 bis 20 °C 7,5; 20 bis 60 °C 13,7 /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.), Mowilith	-10 bis 20 °C 10,3; 20 bis 60 °C 15,6 /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.), Mowilith	-10 bis 20 °C 9,1; 20 bis 60 °C 9,8 /38/
Weißkalkhydrat und Portlandzement HS, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 9,6; 20 bis 60 °C 12,1 /38/
Weißkalkhydrat und Weißzement, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 9,6; 20 bis 60 °C 13,2 /38/
Weißkalkhydrat und Portlandzement, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 10,4; 20 bis 60 °C 11,8 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 9,9; 20 bis 60 °C 10,6 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,8; 20 bis 60 °C 11,8 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,8; 20 bis 60 °C 10,0 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 12,5; 20 bis 60 °C 9,3 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,8; 20 bis 60 °C 8,5 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 5,2; 20 bis 60 °C 8,1 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 11,4; 20 bis 60 °C 11,2 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,8; 20 bis 60 °C 10,3 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,8; 20 bis 60 °C 10,0 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,2; 20 bis 60 °C 11,6 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,4; 20 bis 60 °C 12,2 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 6,2; 20 bis 60 °C 10,3 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,3; 20 bis 60 °C 13,1 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,3; 20 bis 60 °C 14,6 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,3; 20 bis 60 °C 11,9 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,2; 20 bis 60 °C 12,8 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,3; 20 bis 60 °C 13,5 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 11,9; 20 bis 60 °C 10,9 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 8,0; 20 bis 60 °C 13,8 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,5; 20 bis 60 °C 14,4 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,0; 20 bis 60 °C 14,1 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,0; 20 bis 60 °C 11,4 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,4; 20 bis 60 °C 10,9 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	-10 bis 20 °C 7,3; 20 bis 60 °C 11,3 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 8,9; 20 bis 60 °C 10,2 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement,	-10 bis 20 °C 8,8; 20 bis 60 °C 10,2 /38/

Sand (1:5,0 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 6,4; 20 bis 60 °C 6,4 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Zellulosederivate	-10 bis 20 °C 7,0; 20 bis 60 °C 7,0 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Zellulosederivate	-10 bis 20 °C 9,0; 20 bis 60 °C 9,6 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Casein, Zellulosederivate	-10 bis 20 °C 7,8; 20 bis 60 °C 8,0 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.)	-10 bis 20 °C 12,4; 20 bis 60 °C 12,4 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.)	-10 bis 20 °C 10,1; 20 bis 60 °C 10,0 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 7,5; 20 bis 60 °C 8,0 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:7,1 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 9,6; 20 bis 60 °C 9,6 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand/Bims (1:3,3 Gew.), Casein, Zellulosederivate	-10 bis 20 °C 10,9; 20 bis 60 °C 11,9 /38/
Weißkalkhydrat, Sand, (1:2,5 Gew.)	-10 bis 20 °C 10,0; 20 bis 60 °C 8,5 /38/
Weißkalkhydrat und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.)	-10 bis 20 °C 9,7; 20 bis 60 °C 7,9 /38/
Weißkalkhydrat, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 9,7; 20 bis 60 °C 8,8 /38/
Weißkalkhydrat und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 7,7; 20 bis 60 °C 7,8 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.)	-10 bis 20 °C 10,5; 20 bis 60 °C 9,6 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.)	-10 bis 20 °C 8,6; 20 bis 60 °C 8,7 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein	-10 bis 20 °C 9,4; 20 bis 60 °C 8,5 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Wasserstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.)	-10 bis 20 °C 8,5; 20 bis 60 °C 8,2 /38/
Durch Tauchen in Wasser gelöschter Wasserstückkalk, Sand (1:2,5 Gew.)	-10 bis 20 °C 9,9; 20 bis 60 °C 8,5 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Wasserstückkalk und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.)	-10 bis 20 °C 7,9; 20 bis 60 °C 6,7 /38/
HAZ-Mörtel	-20 bis 20 °C 10,7; 20 bis 50 °C 11,7 /23/
HAZm-Mörtel	-20 bis 20 °C 12,3; 20 bis 50 °C 12,95 /23/
HAJ-Mörtel	-20 bis 20 °C 10,75; 20 bis 50 °C 12,34 /23/
HAJm-Mörtel entspricht dem HGJ-Mörtel	-20 bis 20 °C 12,48; 20 bis 50 °C 13,34 /23/ 9,1±1,1 Rinne in /20/

4 MAXIMALE TEMPERATURDIFFERENZ IM MAUERWERK IN K

Dies ist die maximale negative Abweichung der Oberflächentemperatur des Mörtels gegenüber der Temperatur, bei der eine spannungsfreie Oberfläche vorliegen würde (diese kann als die mittlere Wandtemperatur angenommen werden). Dieser Parameter ergibt sich aus den klimatischen Verhältnissen und dem Wandaufbau. Da Natursteinwände i.d.R. ungedämmt sind, kann als mittlere Wandtemperatur das Mittel aus Innen- und Außentemperatur angesetzt werden, wobei aufgrund der thermischen Trägheit Wochenmittel angesetzt werden können.

5 ENDSCHWINDMAßE

Das Ingenieurmodell erfordert die einheitslose Eingabe von Schwindmaßen. Angaben in Prozent sind dazu mit 10^{-2} , in Promille oder mm/m mit 10^{-3} zu multiplizieren.

Für die maximale möglich Zwangsspannung im System Stein/Fuge ist das bei einer definierten relativen Feuchte maximal mögliche Schwindmaß maßgeblich da man erwarten kann, daß die relative Feuchte in der für die Rißbildung entscheidenden Oberflächen des Steins und des Mörtels sehr schnell den Änderungen der relativen Feuchte der angrenzenden Umgebungsluft folgt. Das bedeutet, das sich direkt an der Oberfläche sehr schnell das

Anhang B5

zur jeweiligen relativen Feuchte zugehörige Endschwindmaß einstellen will und durch die Zwängung entsprechende Schwindspannungen in der Oberfläche aufgebaut werden.

5.1 Endschwindmaß des Steins

Kaum abzuschätzen ist die relativen Feuchte bei der die Oberfläche des Steins spannungsfrei im Hinblick auf Schwind/Quellprozesse wäre. Für die Abschätzung des ungünstigsten Falls ist vom Endschwindmaß des ehemals wassergesättigten Steins auszugehen. Diese Annahme liegt auf der sicheren Seite. Als maßgebliche relative Feuchte zur Bestimmung des Endschwindmaßes ist die kleinste mögliche relative Feuchte anzunehmen, die sich aus den klimatischen Randbedingungen der Wand ergibt.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über vorhandene Daten. Werte nach /19,21/ sind Quell-/Schwindmaße. Daten aus /19/ wurden aus den angegebenen Daten umgerechnet. Angaben zu den zugrundegelegten Feuchterandbedingungen liegen nicht vor. Werte aus /35/ sind ebenfalls Quell-/Schwindmaße. Daten aus /22/ sind Schwindmaße. Die vorher unter Wasser gelagerten Proben 4x4x16 cm wurden 7 Tage lang im Klima 20 °C / 65 % r.F. gelagert. Man muß davon ausgehen, daß ein Endschwindmaß dabei noch nicht erreicht wurde. s senkrecht zur Schichtung, p parallel zur Schichtung.

Gesteinsgruppe / Gestein	Quell-/Schwindmaße bzw. Schwindmaße (einheitslos, zu multiplizieren mit 10 ⁻³)		
Sandstein	0,3-0,7 /19/	0,3-0,7 /35/	
Quarzitischer Sandstein	ca. 0,1 /21/	0,3-0,7 /35/	
Cottaer Sandstein	0,561 s; 0,323 p /22/		
Postaer Sandstein	0,005 s; 0,024 p /22/		
Wendischkarsdorfer (Oelsaer) Sandstein	0,089 s; 0,094 p /22/		
Zwickauer Kohlesandstein	0,690 s; 0,301 p /22/		
Zeitzer Sandstein	0,281 s; 0,226 p /22/		
Ummendorfer Sandstein	0,390 s; 0,079 p /22/		
Basalt	0,35 /19/	0,05-0,1 /21/	0,4 /35/
Gabbro	0,13 /19/	0,05-0,1 /21/	0-0,2 /35/
Granit	0,06-0,18 /19/	0,05-0,1 /21/	0-0,2 /35/
Syenit	0,06-0,18 /19/	0-0,2 /35/	
Grauwacke	ca. 0,1 /21/	0-0,1 /35/	
Kalkstein	0,1-0,16 /19/	ca. 0,1 /21/	
Kalksteine außer dichten Kalksteinen	0,1-0,2 /35/		
Dichte Kalksteine	0,1 /19/		
Halberstädter Muschelkalk	0,077 s; 0,106 p /22/		
Dolomit	0,1 /19/ ca. 0,1 /21/		
Travertin	0,1-0,12 /19/		
Porphyre	0-0,2 /35/		
Quarzit, Quarzporphyr, Porphyrit	0,08 /19/		
Trachyt	0,1 /19/	0-0,2 /35/	
Diabas	0,09 /19/	0,05-0,1 /21/	0-0,2 /35/
Bims, Lavaschlacke	ca. 0,1 /21/		
Tuffe	ca. 0,1 /21/	0,2-0,6 /35/	
Rochlitzer Porphyrtuff	0,0001 s; 0,0001 p /22/		
Basaltlava	0,4 /35/		
Schiefer	0,1-0,13 /19/		
Andesit	0,1 /19/		
Diorit	0,12 /19/	0-0,2 /35/	
Gneis, Marmor	ca. 0,1 /21/		
Serpentin	ca. 0,1 /21/	0,1-0,2 /35/	
Quarzit	ca. 0,1 /21/	0-0,1 /35/	

Anhang B6

Von Alfes und Schießl /7/ wurde das Endschwindmaß von Sandsteinen nach einem Jahr Trocknung im Klima 20 °C / 30 % r.F. nach 2 Tagen Vorlagerung in Wasser bei 20 °C detailliert untersucht. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefaßt.

Sandstein	Endschwindmaß, einheitslos, zu multiplizieren mit 10 ⁻³	
	Senkrecht zur Schichtung	Parallel zur Schichtung
Oberkirchner	0,21	0,18
Burgpreppacher	0,06	0,091
Ebenheider	0,39	0,32
Maulbronner	0,47	0,28
Sander	1,46	0,79
Schleeriether	1,1	0,49
Saaler	0,12	0,11
Rüthener	0,15	0,12

Das Endschwindmaß von Sandsteinen nach einem Jahr Trocknung im Klima 20 °C / 65 % r.F. nach 2 Tagen Vorlagerung in Wasser bei 20 °C zeigt folgende Tabelle /7/.

Sandstein	Endschwindmaß, zu multiplizieren mit 10 ⁻³	
	Senkrecht zur Schichtung	Parallel zur Schichtung
Oberkirchner	0,17	0,13
Burgpreppacher	0,049	0,069
Ebenheider	0,48	0,22
Maulbronner	0,41	0,29
Sander	1,44	0,82
Schleeriether	1,01	0,43
Saaler	0,11	0,072
Rüthener	0,12	0,086

Das Endschwindmaß von Sandsteinen nach einem Jahr Trocknung im Klima 20 °C / 80 % r.F. nach 2 Tagen Vorlagerung in Wasser bei 20 °C zeigt folgende Tabelle /7/.

Sandstein	Endschwindmaß, zu multiplizieren mit 10 ⁻³	
	Senkrecht zur Schichtung	Parallel zur Schichtung
Oberkirchner	0,14	0,092
Burgpreppacher	0,06	0,074
Ebenheider	0,49	0,22
Maulbronner	0,34	0,23
Sander	1,34	0,75
Schleeriether	0,96	0,35
Saaler	0,055	0,061
Rüthener	0,094	0,081

Zusammengefaßt kann davon ausgegangen werden, daß das Endschwindmaß bei reinen Quarzsandsteinen und karbonatisch gebundenen Sandsteinen unter 0,2·10⁻³ liegt, bei tonig gebundenen Sandsteinen zwischen 0,2·10⁻³ und 1,4·10⁻³.

5.2 Endschwindmaß des Mörtels

Beim Mörtel ist vom Endschwindmaß des ehemals wassergesättigten Mörtels auszugehen. Als maßgebliche relative Feuchte zur Bestimmung des Endschwindmaßes ist die kleinste mögliche relative Feuchte anzunehmen, die sich aus den klimatischen Randbedingungen der Wand ergibt.

Anhang B7

Für den HGJ-Mörtel wurde in /20/ folgende Gleichung zur Berechnung des Endschwindmaßes ermittelt:

$$\text{Endschwindmaß (einheitslos)} = (\text{relative Feuchte in Prozent} \cdot -0,2429 + 24,39) \cdot 10^{-3}$$

Die folgende Tabelle zeigt Werte aus verschiedenen Quellen.

Mörtel	Schwind- maß, zu multipli- zieren mit 10 ⁻³
Kalkmörtel (Kalk, Sand 1:3) ohne genaue Angaben der Versuchsbedingungen.	17,4 /28/
Muschelkalk K, Fa. Baltus Endschwindmaß bei 20°C/65% r.F	2 /29/
Muschelkalk K, Fa. Baltus, Prüfung nach DIN 52450, Verfahren C ohne Angaben zur Prüfdauer	0,13 /30/
Mineros A, Fa. Krusemark, Prismen 4x4x16 cm, 7 d in 20°C/65% r.F. Kein Endschwindmaß	0,11 /23/
Restaurations-Fugenmörtel, Fa. Quickmix, Prismen 4x4x16 cm, 7 d in 20°C/65% r.F.	0,23 /23/
Kein Endschwindmaß	
Kalkzementmörtel (Zement, Kalk, Sand 1:1:4) ohne genaue Angaben der Versuchsbedingungen.	1,9 /28/
Kalkzementmörtel (Zement, Kalk, Sand 1:1:6) ohne genaue Angaben der Versuchsbedingungen.	0,5 /28/
Kalkzementmörtel (Zement, Kalk, Sand 1:1:8) ohne genaue Angaben der Versuchsbedingungen.	0,1 /28/
Putz- und Mauermörtel MG III, Weißkalkhydrat und Zement, Sand, (1:4,3 Gew.), 28 Tage,	2,1 /38/
kein Endschwindmaß	
Putz- und Mauermörtel MG IIa, Weißkalkhydrat, Zement und Trass, Sand, (1:2,3 Gew.), 28 Tage,	0,5 /38/
kein Endschwindmaß	
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement und Weißkalkhydrat,	0,4 /38/
Sand und Kalksteinmehl (1:2,6 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.), 28 Tage,	1,3 /38/
kein Endschwindmaß	
Dünnbettmörtel MG III, Zement, Kalksteinmehl und Sand, (1:2,6 Gew.), 28 Tage,	1,9 /38/
kein Endschwindmaß	
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement, Sand, (1:3,7 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,5 /38/
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement, Kalksteinmehl, (1:5,5 Gew.), 28 Tage,	0,7 /38/
kein Endschwindmaß	
Fugenmörtel MG III, Zement, Weißkalkhydrat und Kunststoff, Sand, (1:2 Gew.), 28 Tage,	2,2 /38/
kein Endschwindmaß	
Restaurierungsmörtel MG II, Zement, Weißkalkhydrat und Kunststoff, Sand, (1:6 Gew.), 28 Tage,	2,2 /38/
kein Endschwindmaß	
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.) , 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,43 /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.), fließfähig durch Wasserzugabe, 28 Tage,	1,95 /38/
kein Endschwindmaß	
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.), fließfähig durch Fließmittel, 28 Tage,	0,94 /38/
kein Endschwindmaß	
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:3,6 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,60 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand, (1:3,8 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,65 /38/
Weißkalkhydrat, Hochofenzement und Traßzement, Sand, (1:3,7 Gew.), Casein, 28 Tage,	0,66 /38/
kein Endschwindmaß	
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand, (1:3,8 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,72 /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.) , 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,3 /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.), fließfähig durch Wasserzugabe, 28 Tage,	3,7 /38/
kein Endschwindmaß	
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.), fließfähig durch Fließmittel, 28 Tage,	1,1 /38/
kein Endschwindmaß	
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,6 /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:0,9 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	4,0 /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,3 /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	3,5 /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.) , 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,9 /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.), Mowilith, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,8 /38/

Anhang B8

Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.), Mowilith, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,8 /38/
Weißkalkhydrat und Portlandzement HS, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,0 /38/
Weißkalkhydrat und Weißzement, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,2 /38/
Weißkalkhydrat und Portlandzement, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,0 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,7 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,9 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,6 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,1 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,8 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,0 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,5 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,5 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,9 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,91 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,01 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,75 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,02 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,22 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,43 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,70 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,08 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,86 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,68 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,17 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,89 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	3,52 /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	3,03 /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel, 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,93 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,69 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,70 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Zellulosederivate, 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,86 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Zellulosederivate, 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,84 /38/

ein Endschwindmaß	
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Casein, Zellulosederivate, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,03 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Casein, Zellulosederivate, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,14 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,66 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,76 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	0,99 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:7,1 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	3,92 /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand/ Bims (1:3,3 Gew.), Casein, Zellulosederivate, 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,12 /38/
Weißkalkhydrat, Sand, (1:2,5 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	> 10 /38/
Weißkalkhydrat und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	6,6 /38/
Weißkalkhydrat, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	> 10 /38/
Weißkalkhydrat und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	> 10 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	2,2 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	4,7 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein, 28 Tage, kein Endschwindmaß	> 10 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Wasserstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	4,2 /38/
Durch Tauchen in Wasser gelöschter Wasserstückkalk, Sand (1:2,5 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	4,0 /38/
Mit nassem Sand gelöschter Wasserstückkalk und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.), 28 Tage, kein Endschwindmaß	1,9 /38/
HAZ-Mörtel, Prismen 4x4x16 cm, unter Wasser, 7 d in 20°C/65% r.F. Kein Endschwindmaß	1,1 /23/
HAZm-Mörtel, Prismen 4x4x16 cm, unter Wasser, 7 d in 20°C/65% r.F. Kein Endschwindmaß	1,37 /23/
HAI-Mörtel, Prismen 4x4x16 cm, unter Wasser, 7 d in 20°C/65% r.F. Kein Endschwindmaß	1,37 /23/
HAI _m -Mörtel entspricht dem HGJ-Mörtel, Prismen 4x4x16 cm, unter Wasser, 7 d in 20°C/65% r.F. Kein Endschwindmaß	0,55 /23/

Nach Schubert /32/ kann bei Normalmörteln von folgenden Endschwindmaßen ausgegangen werden. Die Werte für Leichtmörtel können bis etwa doppelt so groß werden.

Relative Luftfeuchte in %	Rechenwert (zu multiplizieren mit $\cdot 10^{-3}$)	Wertebereich (zu multiplizieren mit $\cdot 10^{-3}$)
30	1,2	0,7-2,0
50	0,9	0,5-1,5
65	0,8	0,5-1,5
80	0,5	0,2-1,0

6 ZUG-E-MODUL DES STEINS IN N/mm²

Falls erhältlich, sollte der statische Zug-E-Modul für das Ingenieurmodell verwendet werden. Ersatzweise kann auch der dynamische E-Modul herangezogen werden, der jedoch i.d.R. etwas größer ist. Der statische Druck-E-Modul ist für das Ingenieurmodell als grobe Näherung geeignet.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von feinkörnigen Gesteinen ist quasi-elastisch (z.B.: Basalt, Schluffstein). Das Verhalten ändert sich mit zunehmender Korngröße hin zu semi-elastisch (z.B. Sandstein und Marmor). Grobkörnige Gesteine mit hoher Porosität zeigen nicht-elastisches Verhalten (z.B.: Schiefer und Salzgestein) /18/. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist korreliert mit dem E-Modul des Gesteins. Quasi-elastische Gesteine liegen in ihrem E-Modul ca. zwischen 60000-120000 N/mm², semi-elastische Gesteine zwischen 20000 und 60000 N/mm² und nicht-elastische Gesteine zwischen 0 und 20000 N/mm².

Anhang B10

Folgende Angaben wurden aus der Literatur entnommen. In /17/ nach DIN 52100 gemessen. /8,18,26/ ohne genaue Angaben, vermutlich Druck-E-Modul. /7,36,37/ statischer Zug-E-Modul (Lastniveau 1/3 der Festigkeit). /4,6,22,38/ dynamischer E-Modul. /35/ Druck-E-Modul. s senkrecht zur Schichtung, p parallel zur Schichtung.

Gesteinsgruppen / Gesteine		E-Modul in N/mm ²		
Mag- mati- sche Gesteine	Granit	10000-70000 /17/ 55000-90000 /8/	20000-60000 /18/ 40000-60000 /35/	
	Mikrogranit	30000-80000 /18/		
	Syenit	10000-70000 /17/	60000-80000 /18/	40000-60000 /35/
	Gabbro	57000-68000 /17/ 100000-120000 /35/	70000-110000 /18/	105000 /8/
	Diorit	57000-68000 /17/	70000-100000 /18/	100000-120000 /35/
	Porphyry (Quarzporphyry, Kera- tophyry, Porphyry, Andesit)	57000-68000 /17/	20000-160000 /35/	
	Londorfer Basaltlava	48000 /38/		
	Basalt	50000-100000 /17/ 100000 /8/	60000-100000 /18/ 50000-100000 /35/	
	Melaphyry, Basaltlava	50000-100000 /17/		
	Diabas	70000-80000 /17/	60000-120000 /35/	

Anhang B11

Gesteinsgruppen / Gesteine		E-Modul in N/mm ²		
Sedi- ment- ge- steine	Quarzit, Grauwacke	65000-80000 /17/	50000.80000 /35/	
	Vulkanische Tuffsteine	4000-40000 /17/	4000-10000 /35/	
	Rochlitzer Prophyruff	18000 s; 18000 p /22/		
	Ettringer Tuff	8300 lufttrocken, 8600 wassersatt /36/		
	Tuff Hasenstoppel	10100 lufttrocken /36/		
	Weibener Tuff	4800-5200 lufttrocken, 4900 wassersatt /36/		
	Riedener Tuff	7500-9200 lufttrocken, 7200 wassersatt /36/		
	Römertuff	5400 lufttrocken, 4000 wassersatt /36/		
	Sandsteine allgemein	3000-80000 /18/	2000-70000 /8/ 5000-30000 /35/	
	Quarzitische und Quarzsandsteine	4000-40000 /17/	20000-70000 /35/	
	Baumberger Sandstein	15500 /26/		
	Bentheimer Sandstein	10800 /26/		
	Bucher Sandstein	15100 /26/		
	Burgpreppacher Sandstein	14800 /26/	6600 s; 6900 p /7/	
	Obernkirchner Sandstein	16000 /26/	10200 s; 9700 p /7/	
	Rüthener Sandstein	12400 /26/	5900 s; 6300 p /7/	14400-16100 /4,6/
	Sander Schilfsandstein	14600 /26/	9700 s; 15700 p /7/	16000-18600 /4,6/
	Ebenheider	2600 s; 4100 p /7/		
	Maulbronner	5900 s; 5900 p /7/		
	Schleeriether	10800 s; 14100 p /7/		
	Saaler	45400 s; 47900 p /7/		
	Cottaer Sandstein	13000 s; 14000 p /22/		
	Postaer Sandstein	16000 s; 16000 p /22/		
	Wendischkarsdorfer (Oelsaer) Sand.	18000 s; 18000 p /22/		
	Zwickauer Kohlesandstein	9400 s; 7100 p /22/		
	Zeitzer Sandstein	9000 s; 14000 p /22/		
	Ummendorfer Sandstein	17000 s; 18500 p /22/		
	Roter Mainsandstein	14000 /38/		
	Tonschiefer, Tongesteine	10000-35000 /17/	10000-35000 /18/	
	Kalksteine allgemein	10000-70000 /17/	10000-80000 /18/	
		20000-90000 /8/	40000-70000 /35/	
	Dichte (feste) Kalke	25000-70000 /17/	60000-90000 /35/	
	Elmkalk	10400-23900 s, 12400-24600 p /37/		
	Halberstädter Muschelkalk	27000 s; 32000 p /22/		
	Travertin	10000-70000 /17/	20000-60000 /35/	
	Travertin (Langensalza)	3400-23300 s, 12300-33400 p /37/		
	Dolomite	25000-70000 /17/	40000-84000 /18/	60000-90000 /35/
	Harzer Dolomit porös bis dicht	21500-81500 /4,6/		

Gesteinsgruppen / Gesteine		E-Modul in N/mm ²		
Meta- mor- phe Ge- steine	Gneise, Granulit	13000-36000 /17/	30000-80000 /35/	
	Serpentin	13000-36000 /17/		
	Marmor	25000-70000 /17/	110000 /8/	60000-90000 /35/

7 ZUGKRIECHZAHLEN DES STEINS UND MÖRTELS

Die Festlegung der für das Ingenieurmodell relevanten Kriechzahlen ist mit Schwierigkeiten behaftet. Man kann näherungsweise davon ausgehen, daß die Oberfläche eines Mauerwerks spontan den Veränderungen der

Temperatur und relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft folgt. Die Abkühlung oder Entfeuchtung der Umgebungsluft erfolgt jedoch nie spontan, sondern immer mit begrenzter Geschwindigkeit. Gleichzeitig dauern solche Belastungssituationen für die Verfügung jedoch nie unendlich lange an. Dies bedeutet, daß die im Ingenieurmodell anzusetzenden Kriechzahlen zwischen Null und den Endkriechzahlen liegen. Das Einsetzen von Null als Endkriechzahl von Mörtel und/oder Stein liegt immer auf der sicheren Seite, da das Relaxieren der Verbundpartner zum Abbau der Spannungen führt. Das Einsetzen der Endkriechzahlen überschätzt den Spannungsabbau, liegt also auf der unsicheren Seite. Spannungsaufbauende Abkühlungs- und Entfeuchtungsprozesse dauern zumindest einige Stunden. Näherungsweise kann im Ingenieurmodell davon ausgegangen werden, daß innerhalb eines solchen Zeitrahmens etwa 25 % der im folgenden angegebenen Endkriechzahlen erreicht werden.

7.1 Zugkriechzahl des Steins zum relevanten Zeitpunkt

Das Kriechvermögen von Natursteinen korreliert mit dem E-Modul des Gesteins. Winkler /18/ nennt vom E-Modul abhängige Kriechraten aus denen die folgenden Kriechzahlen nach 10 Jahren berechnet wurden. Es handelt sich dabei vermutlich um Druckkriechzahlen.

E-Modul in N/mm ²	Kriechzahl nach 10 Jahren, zu multiplizieren mit 10 ⁻²
120000	0.93
100000	1.02
80000	1.14
60000	1.28
40000	1.63
20000	2.24
5000	4.54

Von Alfes und Schießl /7/ wurde das Zugkriechverhalten (Lastniveau 1/3 der Festigkeit) verschiedener Sandsteine detailliert untersucht. Sie untersuchten das Zuggrundkriechen beim Klima 20 °C / 65 % r.F. nach 10 Monaten Vorlagerung im gleichen Klima und erhielten die im folgenden dargestellten Ergebnisse. Diese Zugkriechzahlen sind im Vergleich zu den ebenfalls gemessenen Druckkriechzahlen sehr groß.

Sandstein	Endzugkriechzahl	
	Senkrecht zur Schichtung	Parallel zur Schichtung
Oberkirchner	0,6	1,05
Burgpreppacher	2,4	
Ebenheider	1,7	0,82
Maulbronner	0,76	
Sander	2,5	
Schleeriether	1,08	
Saaler	0,54	
Rüthener	0,71	

7.2 Zugkriechzahl des Mörtels zum relevanten Zeitpunkt und Erstbelastungsalter

Das Zugkriechverhalten des modifizierten HGJ-Mörtel wurde in /20/ untersucht. Dabei wurden Endkriechzahlen von ca. 1,4 bei einem Erstbelastungsalter von mindestens 14 Tagen und 3,4 bei einem Erstbelastungsalter von 7 Tagen ermittelt.

Nach /34/ kann bei Mauermörtel für im Alter von 7 Tagen mit ca. 1/3 der Prismendruckfestigkeit belastete Prüfkörper von Druck-Endkriechzahlen im Bereich von 5 bis 15 ausgegangen werden. Allerdings kann aus dem Druckkriechen nicht ohne weiteres auf das hier relevante Zugkriechen geschlossen werden.

8 ZUR ANGABE DES STATISCHEN ZUG-E-MODULS DES MÖRTELS BZW. DER ZUGFESTIGKEIT DES MÖRTELS

Die Zugfestigkeit, die Haftzugfestigkeit des Mörtels zum am Bauwerk vorhandenen Stein und der E-Modul des Mörtels sind die wesentlichen Parameter, die bei der Mörtelauswahl und Optimierung eingestellt werden können. Diese drei Parameter sind nicht direkt voneinander abhängig und können deshalb in gewissen Grenzen unabhängig voneinander eingestellt werden.

8.1 Mindestwert der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit normal zur Fugenflanke in N/mm^2 bei Vorgabe des E-Moduls des Mörtels

Wird der E-Modul des Mörtels vorgegeben, ist das Ingenieurmodell in der Lage, den Mindestwert für die Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel zu berechnen.

Dieser Wert muß von der **Steinzugfestigkeit** (axiale Zugfestigkeit) normal zur Fugenflanke überschritten werden, damit keine Risse im Stein auftreten. (Bei Natursteinen ist die Zugfestigkeit häufig von der Richtung abhängig).

Daten aus verschiedenen Quellen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. s senkrecht zur Schichtung, p parallel zur Schichtung.

Gesteinsart / Gestein	Axiale Zugfestigkeit in N/mm^2		
Granit	9-13 /8/	5-10 /17/	
Gabbro	22 /8/		
Basalt	16 /8/		
Rochlitzer Porphyrtuff	1,1 s, 1,1 p /22/		
Ettringer Tuff	0,89 lufttrocken, 0,98 wassersatt /36/		
Tuff Hasenstoppel	0,82 lufttrocken /36/		
Weibener Tuff	1,09-1,44 lufttrocken, 0,80 wassersatt /36/		
Riedener Tuff	1,93-1,96 lufttrocken, 1,68 wassersatt /36/		
Römertuff	1,16 lufttrocken, 0,95 wassersatt /36/		
Sandstein allgemein	0,3-1,1 /8/		
Quarzsandstein	6-10 /17/		
Oberkirchner Sandstein	3,2 s, 3,8 p /7/		
Burgpreppacher Sandstein	1,3 s, 1,5 p /7/		
Ebenheider Sandstein	1,1 s, 2,2 p /7/		
Maulbronner Sandstein	2,0 s, 2,5 p /7/		
Sander Sandstein	1,9 s, 2,6 p /7/		
Schleeriether Sandstein	2,2 s, 3,6 p /7/		
Saaler Sandstein	4,9 s, 5,9 p /7/		
Rüthener Sandstein	1,4 s, 1,2 p /7/	1,10-8,40 /6/	1,25 /9/
Cottaer Sandstein	1,2 s, 1,1 p /22/		
Postaer Sandstein	1,2 s, 1,6 p /22/		
Zwickauer Kohlesandstein	0,4 s, 1,1 p /22/		
Zeitzer Sandstein	1,1 s, 1,9 p /22/		
Ummendorfer Sandstein	1,5 s, 1,9 p /22/		
Kalkstein	2,1-10 /8/	4-8 /17/	
Elmkalk	1,0-2,4 s, 0,6-2,7 p /37/		
Travertin (Langensalza)	0,6-2,4 s, 1,0-3,8 p /37/		
Halberstädter Muschelkalk	1,8 s, 2,3 p /22/		
Harzer Dolomit	größer 2 /6/		
Marmor	15 /8/		

Desweiteren muß ein **Mörtel** ausgewählt werden, dessen Zugfestigkeit den berechneten Wert überschreitet, um eine Rißbildung im Mörtel parallel zur Fugenflanke zu vermeiden. Nach /17/ liegt die Zugfestigkeit von Mörteln der MG II etwa bei 0,3 N/mm² die der MG III bei 1 bis 2 N/mm². Die Zugfestigkeit von Mörteln der MG I ist sehr gering.

Die Zugfestigkeit des in /20/ verwendeten HGJ-Mörtels liegt bei 3 bis 4 N/mm². Unter Verwendung der in /20/ abgeleiteten Reifefunktion:

$$R = t \cdot (T - 1,5 \text{ °C}) - 35 \text{ °C d}$$

in °C

R-Reifegrad in °C·Tagen, t-Alter in Tagen, T-Temperatur

kann die aktuelle Zugfestigkeit des HGJ-Mörtels nach folgender Gleichung bestimmt werden /20/:

$$\text{Axiale Zugfestigkeit in N/mm}^2 = \text{Reifegrad}^{0,25} \cdot 0,66$$

Von Zscheile und Schorn /23/ wird für die folgenden Mörtel Zugfestigkeiten in N/mm² angegeben: HAZ 2,5, HAZm 3,2, HAJ 4,2, HAJm 4,0. Der HAJm entspricht dem HGJ-Mörtel.

Da eine Rißbildung in verschiedenen Erhärtungsstadien des Mörtels einsetzen kann, ist die mögliche Rißbildung mit dem Ingenieurmodell für verschiedene Kombinationen Zugfestigkeit/E-Modul zu überprüfen, wofür idealerweise Zugfestigkeit und statischer Zug-E-Modul bei verschiedenen Reifegraden vorliegen müssen. Als Mindestreifegrad kann dabei der Reifegrad am Ende der Nachbehandlung betrachtet werden.

Schließlich muß die **Haftzugfestigkeit** zwischen dem auszuwählenden Mörtel und dem vorhandenen Steinmaterial größer sein als berechnete Wert. Die Haftzugfestigkeit läßt sich nicht zuverlässig vorausberechnen, sondern muß experimentell überprüft werden. Dabei sind für den Mörtel ähnlich Erhärtungsbedingungen zu schaffen wie im Bauwerk. Niedrige Haftzugfestigkeiten treten insbesondere an Steinen mit geringer Porosität, bzw. geringer eigener Zugfestigkeit auf. Informationen über die Porosität gängiger Natursteine gibt Grimm /1/. Informationen über die Zugfestigkeit von Natursteinen können aus den entsprechenden Hinweisen weiter oben entnommen werden. Die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel kann auch weitgehend unabhängig von der übrigen Rezeptur durch Haftvermittler erhöht werden.

Ist die Steinzugfestigkeit zu gering oder kann mit dem gewählten Mörtel die notwendige Zugfestigkeit oder Haftzugfestigkeit nicht erreicht werden, kann eine Herabsetzung des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit durch Variation der Mörtel Eigenschaften erzielt werden. Eine Verminderung des Wertes ist z.B. durch einen Mörtel mit kleinerem E-Modul zu erreichen.

8.2 Maximaler statischer Zug-E-Modul des Mörtels in N/mm² bei Vorgabe des Mindestwertes der Stein-, Mörtel- und Haftzugfestigkeit

Wird eine maximale Spannung im Verbundsystem Mörtel/Stein normal zur Fugenflanke vorgegeben, ist das Ingenieurmodell in der Lage, den maximalen statischen Zug-E-Modul des Mörtels zu berechnen, damit diese Spannung unter den gegebenen Bedingungen nicht überschritten wird. Ersatzweise kann als Vergleich auch der dynamische E-Modul herangezogen werden, der jedoch i.d.R. etwas größer ist. Der statische Druck-E-Modul ist für das Ingenieurmodell als grobe Näherung geeignet.

Unter Verwendung der in /20/ abgeleiteten Reifefunktion:

$$R = t \cdot (T - 1,5 \text{ °C}) - 35 \text{ °C d}$$

in °C

R-Reifegrad in °C·Tagen, t-Alter in Tagen, T-Temperatur

kann der aktuelle E-Modul des HGJ-Mörtels nach folgender Gleichung bestimmt werden /20/:

$$\text{E-Modul in N/mm}^2 = \text{Reifegrad}^{0,37} \cdot 1339$$

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung von Daten aus verschiedenen Quellen.

Anhang B15

Mörtel	E-Modul in N/mm ²
MG I, MG II	ca. 6000 /17/
MG III	8000-15000 /17/
Kalkmörtel (Kalk, Sand 1:4)	2530-2760 /27/
Muschelkalk K, Fa. Baltus nach 7 Tagen in Form bei 20 °C	Dyn. 8460 /29/
Muschelkalk K, Fa. Baltus nach 7 Tagen in Form bei 20 °C und 90Tagen bei 20°C/65% r.F	Dyn. 12480 /29/
Hydraulischen Kalkmörtel (Kalk, Puzzolan, Sand 1:1:4)	1700-2700 /27/
Trass-Mörtel, Fa. Tubag	Dyn. feuchter Zustand: 9600, bei 20°C/65% r.F: 14000 /13/
Trass-Kalk-Mörtel, Fa. Tubag	Dyn. 25500 /23/
Trass-Zement-Mörtel, Fa. Tubag	Dyn. 26000 /23/
Mineros A, Fa. Krusemark	Dyn. 26000 /23/
Restaurations-Fugenmörtel, Fa. Quickmix	Dyn. 28500 /23/
Saniermörtel für gipshaltiges Mauerwerk, Fa. Tubag	Dyn. feuchter Zustand: 13800, bei 20°C/65% r.F: 21600 /13/
Restaurierungsmörtels für gipshaltiges Mauerwerk, Fa Tubag (5-390-10-000, alt: 390.101)	Dyn. 4000
Gipsbeständiger Fugenmörtel, Fa Tubag	Dyn. 8000
Colfirmit 8434, Fa Colfirmit Rajasil (modifizierter Kalk-Trockenmörtel)	Dyn. feuchter Zustand: 9500, bei 20°C/65% r.F: 9200 /13/
Zementmörtel	bis 20000 /17/
Putz- und Mauermörtel MG III, Weißkalkhydrat und Zement, Sand, (1:4,3 Gew.)	Dyn. 13300 28 d, 14500 90 d /38/
Putz- und Mauermörtel MG IIa, Weißkalkhydrat, Zement und Trass, Sand, (1:2,3 Gew.)	Dyn. 8200 28 d, 9500 90 d /38/
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement und Weißkalkhydrat, Sand und Kalksteinmehl (1:2,6 Gew.)	Dyn. 10000 28 d, 11800 90 d /38/
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.)	Dyn. 11900 28 d, 11400 90 d /38/
Dünnbettmörtel MG III, Zement, Kalksteinmehl und Sand, (1:2,6 Gew.)	Dyn. 11700 28 d, 11500 90 d /38/
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement, Sand, (1:3,7 Gew.)	Dyn. 18800 28 d, 19100 90 d /38/
Putz- und Mauermörtel MG III, Zement, Kalksteinmehl, (1:5,5 Gew.)	Dyn. 17200 28 d, 16200 90 d /38/
Fugenmörtel MG III, Zement, Weißkalkhydrat und Kunststoff, Sand, (1:2 Gew.)	Dyn. 10200 28 d, 10800 90 d /38/
Restaurierungsmörtel MG II, Zement, Weißkalkhydrat und Kunststoff, Sand, (1:6 Gew.)	Dyn. 3800 28 d, 3900 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.)	Dyn. 24700 28 d, 21100 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.), fließfähig durch Wasserzugabe	Dyn. 16700 28 d, 150000 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:2,6 Gew.), fließfähig durch Fließmittel	Dyn. 27200 28 d, 26200 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Traßzement, Sand, (1:3,6 Gew.), Casein	Dyn. 12000 28 d, 13700 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand, (1:3,8 Gew.), Casein	Dyn. 12600 28 d, 13500 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Hochofenzement und Traßzement, Sand, (1:3,7 Gew.), Casein	Dyn. 11600 28 d, 12600 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand, (1:3,8 Gew.)	Dyn. 19600 28 d, 18000 90 d /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.)	Dyn. 1500 28 d, 1700 90 d /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.), fließfähig durch Wasserzugabe	Dyn. 1000 28 d, 1800 90 d /38/
Sumpfkalk und Portlandzement, Sand, (1:4,1 Gew.), fließfähig durch Fließmittel	Dyn. 1700 28 d, 1800 90 d /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.)	Dyn. 1400 28 d, 1600 90 d /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:0,9 Gew.)	Dyn. 1500 28 d, 1400 90 d /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.)	Dyn. 1200 28 d, 1500 90 d /38/
Sumpfkalk, Hochofenzement und Trass, Sand, (1:1,9 Gew.)	Dyn. 2700 28 d, 1700 90 d /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.)	Dyn. 1300 28 d, 1800 90 d /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.), Mowilith	Dyn. 1400 28 d, 1700 90 d /38/
Sumpfkalk und Hochofenzement, Sand, (1:4 Gew.), Mowilith	Dyn. 1200 28 d, 1700 90 d /38/

Anhang B16

Weißkalkhydrat und Portlandzement HS, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 7600 28 d, 6700 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Weißzement, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 7000 28 d, 6500 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Portlandzement, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 8900 28 d, 8000 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 6700 28 d, 5400 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 5400 28 d, 4600 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Trass, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 7100 28 d, 6100 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 200 28 d, 200 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 300 28 d, 200 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Molererde, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 400 28 d, 200 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 11800 28 d, 9700 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 12000 28 d, 10000 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Phonolitmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 12300 28 d, 11000 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 7800 28 d, 6800 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 7300 28 d, 6400 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Glasmehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 8300 28 d, 7100 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 18700 28 d, 15000 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 17400 28 d, 12900 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Hochofenschlacke, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 18900 28 d, 16300 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 9600 28 d, 8400 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 8400 28 d, 7300 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Granumehl, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 10500 28 d, 9600 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 8200 28 d, 6800 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 8200 28 d, 7300 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und EFA-Füller, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 10000 28 d, 8900 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement HS und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 8200 28 d, 6800 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Weißzement und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 10000 28 d, 7000 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Portlandzement und Silikastaub, Sand (1:2 Gew.), Fließmittel	Dyn. 10600 28 d, 8000 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Casein	Dyn. 25200 28 d, 28500 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Casein	Dyn. 26900 28 d, 26700 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Zellulosederivate	Dyn. 13300 28 d, 13400 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Zellulosederivate	Dyn. 7300 28 d, 7800 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.), Casein, Zellulosederivate	Dyn. 21700 28 d, 22700 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Casein, Zellulosederivate	Dyn. 16200 28 d, 17300 90 d /38/

Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:3,3 Gew.)	Dyn. 24400 28 d, 24700 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.)	Dyn. 14700 28 d, 15000 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:5,0 Gew.), Casein	Dyn. 12500 28 d, 11900 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand (1:7,1 Gew.), Casein	Dyn. 7500 28 d, 8900 90 d /38/
Weißkalkhydrat und Hochofenzement, Sand/Bims (1:3,3 Gew.), Casein, Zellosederivate	Dyn. 13100 28 d, 21100 90 d /38/
Weißkalkhydrat, Sand, (1:2,5 Gew.)	Dyn. 2500 28 d, 3300 90 d 5700 90 d CO ₂ angereichert /38/
Weißkalkhydrat und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.)	Dyn. 2900 28 d, 3200 90 d 3300 90 d CO ₂ angereichert /38/
Weißkalkhydrat, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein	Dyn. 2600 28 d, 2800 90 d 5800 90 d CO ₂ angereichert /38/
Weißkalkhydrat und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein	Dyn. 5100 28 d, 5300 90 d 7500 90 d CO ₂ angereichert /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.)	Dyn. 2300 28 d, 3400 90 d 4600 90 d CO ₂ angereichert /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.)	Dyn. 3400 28 d, 3600 90 d 5200 90 d CO ₂ angereichert /38/
Mit nassem Sand gelöschter Weißstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.), Casein	Dyn. 4800 28 d, 5200 90 d 7900 90 d CO ₂ angereichert /38/
Mit nassem Sand gelöschter Wasserstückkalk, Sand, (1:2,5 Gew.)	Dyn. 3900 28 d, 4500 90 d 9400 90 d CO ₂ angereichert /38/
Durch Tauchen in Wasser gelöschter Wasserstückkalk, Sand (1:2,5 Gew.)	Dyn. 2400 28 d, 2800 90 d 7400 90 d CO ₂ angereichert /38/
Mit nassem Sand gelöschter Wasserstückkalk und Trass, Sand, (1:2,5 Gew.)	Dyn. 2400 28 d, 2700 90 d 5900 90 d CO ₂ angereichert /38/
Polystyrolhaltige Sanierputze (Remers)	Dyn. 2730
HAZ-Mörtel	Dyn. 14500 /23/
HAZm-Mörtel	Dyn. 16000 /23/
HAI-Mörtel	Dyn. 19700 /23/
HAIIm-Mörtel entspricht dem HGJ-Mörtel	Dyn. 18000 /23/

Nach /31/ läßt sich der E-Modul (Längsdehnungsmodul) nach folgenden Gleichungen aus der oftmals vorhandenen oder leicht bestimmaren Druckfestigkeit β_D abschätzen:

Normalmörtel: $E = 2100 \beta_D^{0,7}$

Leichtmörtel mit Blähtonzuschlag: $E = 1200 \beta_D^{0,6}$

Leichtmörtel mit Perlitezuschlag: $E = 1200 \beta_D^{0,4}$

Da eine Rißbildung in verschiedenen Erhärstungsstadien des Mörtels einsetzen kann, ist die mögliche Rißbildung mit dem Ingenieurmodell für verschiedene Kombinationen Zugfestigkeit/E-Modul zu überprüfen, wofür idealerweise Zugfestigkeit und statischer Zug-E-Modul bei verschiedenen Reifegraden vorliegen müssen. Als Mindestreifegrad kann dabei der Reifegrad am Ende der Nachbehandlung betrachtet werden.

9 AUSGABE DER TEILDEHNUNGEN

Die Ausgabe der Teildehnungen ist hilfreich um zu beurteilen, ob thermische oder hygrische oder beide Spannungsarten für eine Rißbildung verantwortlich sind und ob das Kriechen einen wesentlichen Anteil am Abbau der Spannungen hat.

10 LITERATUR

- /1/ Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsheft 50, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München, 1990
- /2/ Krus, M.: Feuchttransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995

- /3/ Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- /4/ Rinne, A.; Rostásy, F.S.: Zur Neuverfugung an der St. Johannis Kirche in Ellrich. Berichte zur Denkmalpflege-Forschung. Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie, Vorhaben BAU 7025 B. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 1995
- /5/ Schmidt-Döhl, F.: Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996
- /6/ Rinne, A.; Marzaganov, R.; Rostásy, F.S.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörteln und Naturstein unter Bewitterung. Berichte zur Denkmalpflege-Forschung, MPA Braunschweig, 1994
- /7/ Alfes, Ch.; Schießl, P.: Spannungsdehnungsverhalten, Schwinden und Kriechen von Sandsteinen. In: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall und Steinkonservierung, S.3-17, Ernst und Sohn, Berlin, 1994
- /8/ Fecker, E.; Reik, G.: Baugeologie. Enke, Stuttgart, 1987
- /9/ Alfes, Ch.: Bruchmechanisches Werkstoffverhalten von Sandstein unter Zugbeanspruchung. Aachener Beiträge zur Bauforschung, Band 1, zgl. Dissertation, Aachen, 1993
- /10/ Rinne, A.; Warnecke, P.; Rostásy, F.S.: Zur Dauerhaftigkeit von Verfugungen unter thermisch-hygrischer Einwirkung. In: Wiss. Zeitschrift der HAB Weimar, Heft 5/6/7/1994, anlässlich der 12. Int. Baustofftagung ibausil in Weimar, 1994
- /11/ Warnecke, P.; Weiß, D.; Rostásy, F.S.: Zur Haftzugfestigkeit zwischen HGZ-LCF-Fugenstopfmörtel und Naturstein. 3. Int. Koll. „Werkstoffwissenschaften und Bausanierung“, Esslingen 1992
- /12/ Weber, N.: Über den Einfluß der Fugentiefe auf die Eigenschaften von Fugenmörtel aus bewitterten Naturstein-Mörtel-Verbundkörpern. Großer Entwurf in der Vertiefungsrichtung Baustofftechnologie an der TU Braunschweig, 1994
- /13/ Zscheile, H.: Eigenschaften und Verarbeitung faserbewehrter Fugenmörtel. In: Rostásy, F.S.; Wigger, H. (Hrsg.): Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk. Tagung Braunschweig 1997. Heft 135 der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, S.175-190, 1997
- /14/ Rostásy, F.S.; Weiß, D.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörtel und Natursteinen. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, MPA Braunschweig, 1992
- /15/ Information Pressbau GmbH, Oberhausen
- /16/ Schmidt-Döhl, F.; Rostásy, F.S.: A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral building materials. I. Simulation model. Cement and Concrete Research, Bd. 29, S. 1039-1046, 1999, II. Experimental Verification. Cement and Concrete Research, Bd. 29, S. 1047-1054, 1999
- /17/ Weber, H., et. al: Fassadenschutz, Expert Verlag, Grafenau, 1980
- /18/ Winkler, E.M.: Stone: Properties, Durability in Man's Environment, Springer, Wien, 1973
- /19/ Knöfel, D.: Ursachen der Natursteinverwitterung – Natursteinschäden an Bauwerken, Teil I. B+B, Bd. 3; S. 48-55, 1980
- /20/ Schmidt-Döhl, F.; Rostásy, F.S.: Ingenieurmodell zur Dauerhaftigkeit des Verbundsystems Naturstein/Mörtelfuge mit Bezug auf die Neuverfugung historischen Mauerwerks. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert von der DFG (Langfassung), 2000
- /21/ Rostásy, F.S.: Baustoffe, Kohlhammer, Stuttgart, 1981
- /22/ Zscheile, H.; Schorn, H.; Menzel, U.; Dietel, H.: Gesteinstechnische Kennwerte für ausgewählte Natursteine aus Vorkommen in Sachsen und Sachsen-Anhalt. Berichte zur Denkmalpflege-Forschung. November 1997
- /23/ Zscheile, H.; Schorn, H.: Objektbericht zur Fugenkonsolidierung an einer Musterfläche in Ummendorf. Berichte zur Denkmalpflege-Forschung. November 1997
- /24/ Dettling, H.: Die Wärmedehung des Zementsteines, der Gesteine und der Betone. Abhandlung, TH Stuttgart, 1961
- /25/ Szilagy, J.: Untersuchung petrophysikalischer Eigenschaften an Leitgesteinen der Denkmalpflege. Bericht TU Dresden, Institut f. Geotechnik, Angewandte Geologie, gefördert durch das BMBF, 1995

- /26/ Boss, M.; Grobe, J.; Hilbert, G.; Müller-Rochholz, J.: Modified elastic silicid-acid ester applied on natural stone and tests of their efficiency. Proceedings of the 8th Int. Conf. on Deterioration and conservation of Stone S. 1179-1185, Berlin, 1996
- /27/ Henriques, F.M.A.; Charola, E.: Comparative study of standard test procedures for mortars. Proceedings of the 8th Int. Conf. on Deterioration and conservation of Stone S. 1521-1528, Berlin, 1996
- /28/ Domasłowski, W.: The properties of lime and cement mortars modified by metakaolinite. Proceedings of the 8th Int. Conf. on Deterioration and conservation of Stone S. 1529-1534, Berlin, 1996
- /29/ Prüfbericht A 2899 vom 3.3.1997 des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen für die Fa. Baltus Trockenbaustoffe.
- /30/ Prüfzeugnis R 262/97 3.1 der Materialprüfanstalt Eckernförde vom 28.1.1997 für die Fa. Baltus Trockenbaustoffe.
- /31/ Schubert, P.: Einfluß von Leichtmörtel auf Tragfähigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk. In: Ziegelindustrie International 38, S. 327-335, 1985
- /32/ Schubert, P.: Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk. Dissertation, RWTH Aachen, 1982
- /33/ Knöfel, D.; Schubert, P. (Hrsg.): Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsmittel in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege, Ernst&Sohn Berlin, 1993
- /34/ Institut für Bauforschung Aachen(Hrsg.): Kriechverhalten von Mauerwerk. Forschungsbericht Nr. F 163, 1984 sowie Glitzka, H.: Zum Kriechen von Mauerwerk. In: Die Bautechnik, S. 415-418, 1985
- /35/ Mauerwerkskalender, Ernst&Sohn, 1999, Verweis auf Literatur [28-31] Seite 110
- /36/ Sybertz, F.: Ermittlung von Baustoffkennwerten von Tuffgestein und Möglichkeiten zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Tuffsteinmauerwerk, Teil 1: Untersuchung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Forschungsbericht Nr. F 168, 1986
- /37/ Geißler, T.: Untersuchungen über das Zugbruchverhalten von Naturstein. Großer Entwurf. TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1998
- /38/ Wissler, S.: Historische und moderne Mörtel im Verbund mit Naturstein. Hochschulverlag, Freiburg, 1989